

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАРАНДИЧ КАТЕРИНА СЕРГІЇВНА

УДК 621.7.015:539.422.24

ДИСЕРТАЦІЯ
ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ
ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЇХ ТОКАРНОМУ
ОБРОБЛЕННІ

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить власні дослідження. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ К.С. Барандич

Науковий керівник: Вислоух Сергій Петрович, кандидат технічних наук, доцент

Київ - 2018

АНОТАЦІЯ

Барандич К.С. Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей при їх токарному обробленні. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 «Технологія машинобудування» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена питанням технологічного забезпечення циклічної довговічності матеріалу деталей, що працюють в умовах циклічних навантажень шляхом оптимізації режимів їх токарного оброблення. Представлено аналіз впливу стану поверхневого шару деталей, що працюють під дією циклічних навантажень, на їх втомні характеристики. Виконано огляд методів визначення циклічної довговічності, що показав обмеженість відомостей про математичні залежності циклічної довговічності матеріалу деталі від технологічних умов її виготовлення.

При проведенні дисертаційних досліджень в якості оброблюваного матеріалу вибрано конструкційну леговану хромисту сталь 40Х ГОСТ 4543-71. З цього матеріалу виготовляють деталі, що піддаються вібраційним та динамічним навантаженням, до яких пред'являються вимоги підвищеної міцності, в'язкості та довговічності.

Для дослідження впливу технологічних умов токарного оброблення на зміну втомних характеристик матеріалу деталі використовували гладкі зразки круглого перерізу типу І згідно з ГОСТ 25.502-79. Токарне оброблення виконували на токарному оброблюваному центрі HAAS ST20 різцем PVVNN 2525M-16Q з різальною пластинкою VBGW 160404T00815SE без охолодження в діапазоні швидкостей різання від 80 до 180 м/хв. та подач – від 0,08 до 0,12 мм/об при глибині різання 0,3 мм.

Випробування зразків на втому виконували на базі $N = 2 \cdot 10^7$ циклів при температурі 20°C за частоти обертання зразків 2000 об/хв. на випробувальній

машині МУИ-6000. При цьому використано схему навантаження згідно з ГОСТ 25.502-79 у вигляді чистого згину при обертанні зразка.

Випробування на статичний розтяг з метою визначення механічних характеристик матеріалу зразків виконували у відповідності з ГОСТ 1497-84. Для проведення досліджень на випробувальному стенді BISS Bi-01-103 розроблено ескіз зразку. Дослідження на розтяг проводили із постійною швидкістю переміщення активного рухомого захвату з записом діаграм деформування зразку.

Визначення параметрів шорсткості досліджуваних зразків, що оброблені на різних режимах токарного оброблення в діапазоні швидкостей різання від 80 до 180 м/хв. та подач – від 0,08 до 0,16 мм/об при глибині різання t 0,3 мм, виконували з використанням приладу MarSurf PS1.

Мікротвердість поверхневих шарів зразків вимірювали у відповідності з ДСТУ ISO 6507-1:2007 за Вікерсом на мікротвердомірі ПМТ-3. Для оцінки глибини та ступеня зміцнення поверхні використовували метод вимірювання мікротвердості на косих шліфах.

З метою визначення впливу режимів токарного оброблення на мікроструктуру матеріалу зразків виконували металографічні дослідження на мікрошліфах з використанням скануючого електронного мікроскопу РЕМ 106И.

Обробку результатів експериментальних досліджень з метою отримання математичних моделей здійснювали за методикою багатofакторного регресійного аналізу даних. Врахування реальних значень хімічного складу та фізико-механічних властивостей матеріалів класифікаційної групи для розширення діапазону використання отриманих математичних залежностей здійснювали методами багатовимірної статистичної аналізу.

Розв'язання задачі визначення раціональних технологічних параметрів токарного оброблення деталей, що представляє собою багатовимірну задачу нелінійного програмування з різними видами обмежень, виконували за методом ковзаючого допуску.

При розв'язанні задачі оптимізації режимів токарного оброблення деталі, що працює в умовах циклічних навантажень, в якості критерію оптимальності використано максимальну продуктивність процесу фінішного токарного оброблення, розроблено методику розв'язання цієї задачі.

З метою визначення напружень в матеріалі деталі в процесі її експлуатації застосовували кінцево-елементний аналіз. Для його використано програмний комплекс FEMAP 10.2.0 фірми Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.

Аналіз отриманих результатів дослідження параметрів шорсткості показав, що найменші значення параметрів Ra , Rz та Sm відповідають режиму оброблення – $V=180$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм та R_{max} – $V=120$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм. Найбільші значення параметрів Ra , R_{max} отримано за режиму оброблення – $V=80$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм, а Rz – $V=80$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм та Sm – $V=180$ м/хв., $S=0,16$ мм/об, $h=0,3$ мм. Аналіз результатів наведених досліджень параметрів шорсткості підтверджують висновки про те, що найбільш інформативними і чутливими до зміни режимів різання є Sm та R_{max} .

Визначення металографічних властивостей поверхневого шару зразків здійснювали на мікрошліфах. Відповідно до значень мікротвердості поверхні $H_{нов}$ та основного матеріалу $H_{осн}$ розраховували ступінь зміцнення пластично деформованих поверхневих шарів u_n після токарного оброблення за різних режимів різання. Аналіз отриманих результатів показав, що найбільші значення ступеня зміцнення пластично деформованих поверхневих шарів відповідають режимам токарного оброблення – $V=80$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм та $V=120$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм, а найменші – $V=80$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм та $V=180$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм.

Дослідження впливу режимів токарного оброблення на мікроструктуру приповерхневих шарів мікрошліфів дозволили отримати їх електронні фрактографії. Вони показали, що для зразків з режимами оброблення – $V=80$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм; $V=120$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм;

$V=180$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм в приповерхневих шарах переважає фаза перліту в порівнянні з фазою фериту. Для зразків, що оброблені за режимів оброблення – $V=120$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм; $V=120$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм; $V=180$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм фаза перліту менше виражена, а для зразків за режимами оброблення – $V=80$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм; $V=180$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм майже не проглядається. Результати мікроструктурного аналізу угоджуються з отриманими попередньо значеннями ступенів зміцнення, адже перліт є твердою, ферит – м'якою фазою структури металу.

Результати досліджень параметрів якості поверхневого шару зразків за показниками шорсткості, мікротвердості та мікроструктури дозволили встановити, що кожний із цих показників є чутливим до режиму токарного оброблення, які в подальшому впливають на циклічну довговічність деталей в умовах експлуатації при змінних навантаженнях.

З метою визначення комплексного впливу стану поверхневого шару зразків на їх втомну міцність після токарного оброблення шляхом обробки результатів досліджень шорсткості та мікротвердості отримано математичні залежності R_{max} , S_m та u_H від режимів різання. Дані математичні залежності дозволили створити комплексний показник стану поверхневого шару деталі $P(S, V)$, який на досліджуваному інтервалі швидкостей і подач при збільшенні подачі і швидкості різання зростає. Це дозволяє зробити припущення про відповідне зростання циклічної довговічності.

Для дослідження механічних характеристик матеріалу при статичному розтягу виготовлено відповідні зразки зі сталі 40Х. При проведенні досліджень зразки встановлювали в гідравлічні самоцентруючі захвати випробувального стенду BISS Bi-01-103. Зразки розтягували при постійній швидкості руху захватів з визначенням залежності подовження зразку Δl під дією зусилля P .

За результатами експериментальних досліджень визначено границю міцності σ_b , границю пропорційності $\sigma_{mц}$, границю текучості $\sigma_{тек}$, модуль пружності E , відносне звуження ψ та відносне видовження δ досліджуваного

матеріалу, що дозволило встановити умови проведення його досліджень на втому.

З метою отримання залежності циклічної довговічності матеріалу деталі від режимів різання при токарному обробленні виконано випробування зразків зі сталі 40X на втому.

За результатами досліджень побудовано криві багатоциклової втоми зразків зі сталі 40X при симетричному режимі навантаження з використанням одинарних логарифмічних координат, які дали можливість зробити висновок про суттєвий вплив режимів токарного оброблення на довговічність деталей та можливість її прогнозування і створення відповідної методики технологічного забезпечення.

На основі результатів експериментальних досліджень на втому та їх обробки, розроблено математичну залежність циклічної довговічності деталі зі сталі 40X від режимів токарного оброблення та напруження циклу. Аналіз даної залежності показав, що циклічна довговічність при токарному обробленні зразків зі сталі 40X для значення подач від 0,08 до 0,12 мм/об, швидкостей різання від 80 до 180 м/хв. та глибини різання 0,3 мм збільшується при збільшенні як подачі, так і швидкості різання. При цьому вплив подачі має більш вагоме значення. Це відповідає отриманій математичній моделі комплексного показника стану поверхневого шару деталі і дозволяє підтвердити достовірність математичної моделі циклічної довговічності для деталі зі сталі 40X.

При розв'язанні задачі технологічного забезпечення циклічної довговічності деталей в якості критерію оптимальності використано продуктивність процесу фінішного токарного оброблення.

Визначення раціональних значень швидкості та подачі різання здійснювали із області допустимих рішень. При розв'язанні даної задачі ця область задана множиною обмежень на процес токарного оброблення, а також включає експлуатаційне обмеження по кількості циклів до руйнування деталі.

Таким чином, створено математичну модель процесу токарного оброблення деталі, що виготовлена зі сталі 40Х.

Для розширення діапазону використання математичної моделі циклічної довговічності на деталі, що виготовляються із конструкційних матеріалів групи легованих хромистих сталей, до якої відноситься сталь 40Х, застосовано методику врахування характеристик будь якого матеріалу даної групи для отримання відповідної математичної моделі циклічної довговічності. Це дозволяє на основі математичної моделі циклічної довговічності одного матеріалу класифікаційної групи отримати відповідні моделі для будь якого матеріалу без проведення додаткових, довготривалих та коштовних експериментальних досліджень.

З метою розв'язання задачі оптимізації режимів токарного оброблення деталей, розроблено відповідне програмне забезпечення на мові програмування С#.

Для визначення максимальних напружень в матеріалі деталі в умовах її експлуатації здійснювали кінцево-елементний аналіз в середовищі програмного комплексу FEMAP 10.2.0.

Наведено методичні рекомендації з визначення раціональних режимів токарного оброблення деталей на етапі технологічної підготовки виробництва з метою технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності деталі з урахуванням реальних умов її експлуатації за максимальної продуктивності процесу фінішного токарного оброблення.

Як приклад використання запропонованої методики розв'язана задача технологічного забезпечення циклічної довговічності деталі «Вал поворотного механізму», що виготовлена зі сталі 40Х ГОСТ 4543-71, яка працює в умовах циклічного навантаження.

Основні результати дисертаційних досліджень апробовані на прикладі деталей, що виготовляються на ПАТ «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики», м. Київ.

Ключові слова: технологічне забезпечення, опір втоми, циклічна довговічність, стан поверхневого шару, токарне оброблення, багатовимірний статистичний аналіз, математичне програмування.

Список публікацій здобувача:

1. Барандич К.С. До питання визначення оброблюваності конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Збірник наукових праць «Прогресивні технології та прилади». – 2011. – №1. – С. 14-26.
2. Барандич К.С. Методика визначення раціональних режимів обробки конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2011. – Вип. 41. – С. 110-119.
3. Барандич К.С. Вибір раціональних режимів обробки конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – 2011. – Вип. 10. – с.64-72.
4. Barandich C.S. The limit of endurance, as the main indicator of operational properties details of devices / C.S. Barandich, Vysloukh S.P., Voloshko O.V. // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Зб. наук. пр. – 2014. – №786. – с. 35-39.
5. Барандич К.С. Створення кінцево-елементної моделі валу та вирішення крайової задачі напружено-деформованого стану матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Редколегія: С.Ф. Пічугін (головний редактор) та ін. – Вип. 2 (41). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – с. 228-232.
6. Барандич Е.С. К вопросу технологического обеспечения требуемых эксплуатационных свойств деталей приборов / Е.С. Барандич, С.П. Вислоух // Справочник. Инженерный журнал.–2015. – № 2. – С. 34-38.
7. Барандич К.С. Вплив параметрів шорсткості оброблених поверхонь на характеристики опору втоми деталей / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.І. Паткевич // Вісник ЧДТУ. – 2015. – № 1. – С.116–122.

8. Барандич Е.С. Исследование влияния режимов механической обработки на усталостные характеристики инструментальных легированных сталей / Е.С. Барандич, Ю.А. Федоран, В.М. Волкогон, В.С. Антонюк, С.П. Выслоух, С.К. Аврамчук // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – 2015. – №36.–С.38-43.

9. Barandich C.S. The dependence of the physical and mechanical properties of tool steel alloys from the type of machining / C.S. Barandich, V.S. Antonyuk, V.M. Volkogon, S.P. Vysloukh, S.K. Avramchuk, Y.A. Fedoran // International journal for science and innovations for the industry, Innovations in discrete productions. – Sofia, 1/2015, p.25-27.

10. Барандич Е.С. Влияние технологических параметров механической обработки на структурное состояние поверхностных слоев и сопротивление усталости стали ХВСГ / Е.С. Барандич, Ю.А. Федоран, В.М. Волкогон, В.С. Антонюк, С.П. Выслоух, Д.А. Котляр, А.В. Кравчук // Резание и инструмент в технологических системах. – 2015. – №85. – С. 8-16.

11. Барандич К.С. Методика визначення циклічної довговічності матеріалу деталей, що працюють в умовах змінних навантажень / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. –№4(75). – С.30-37.

12. Catherine Barandych Lathe Turning Mode Optimization for Parts Working under Conditions of Cyclic Loading / Catherine Barandych, Sergey Vyslouh, Victor Antoniuk, Oleksandr Tymoshenko, Viktor Koval // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2016. – Vol. 2, No. 2. – pp. 53–60.

SUMMARY

Barandych K.S. Technological providing of fatigue life of details at their turning processing. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a candidate of technical science degree in speciality 05.02.08 «Engineering techniques». – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to questions of technological assurance of fatigue life of the material of parts working in conditions of cyclic loads by optimization of their cutting parameters. The analysis of the influence of the surface layer of the parts operating under the influence of cyclic loads on their fatigue characteristics is presented. An overview of the methods for determining fatigue life, which showed limited information about the mathematical dependences of fatigue life of the part's material from the technological conditions of its production, is complete.

In carrying out dissertation researches the steel 40X ГОСТ 4543-71 was chosen as a processed material. Parts that operate under vibration and dynamic loads, to which requirements of increased durability, viscosity and durability are imposed, are usually made from this material.

In order to study the influence of the technological conditions of the turning process on the change of the fatigue characteristics of the part's material, samples of a round section of type I (GOST 25.502-79) were used. The turning process was performed on a turning center HAAS ST20 with a cutting tool PVDNN 2525M-16Q with a cutting plate VBGW 160404T00815SE without cooling in the range of cutting speeds from 80 to 180 m/min. and feeds – from 0.08 to 0.12 mm/rev at a cutting depth of 0.3 mm.

Fatigue tests were being carried on the base of $N = 2 \cdot 10^7$ cycles at a temperature of 20 ° C with a rotational frequency of 2000 rpm. on the test machine MYH-6000. In this case, the load diagram pure bend in rotation of the sample according to GOST 25.502-79 was used.

The static tensile test for the determination of the mechanical characteristics of the material of the samples was performed in accordance with GOST 1497-84. For the research on the test bench BISS Bi-01-103 a sketch of the sample was developed. Stretching studies were carried out with a constant rate of movement of an active moving capture with the recording of patterns of deformation of the sample.

Determination of the roughness parameters of the investigated samples, which processed at different cutting conditions in the range of cutting speeds from 80 to 180 m/min. and feeds – from 0.08 to 0.16 mm/rev at a cutting depth of 0.3 mm, was performed using the MarSurf PS1 device.

Microhardness of samples's surface layers were measured in accordance with DSTU ISO 6507-1: 2007 on a micro Vickers hardness tester HMT-3. To measure the depth and degree of surface strengthening, a method of measuring microhardness on beveled samples was used.

In order to determine the influence of the cutting conditions on the microstructure of the samples's material, metallographic studies were performed using a scanning electron microscope REM 106I.

The processing of the experimental study's results to obtain mathematical models was carried out using the method of multi-factor regression analysis. The account of the real values of the chemical composition, the physical and mechanical properties of the classification group materials for the expansion of the using range of the obtained mathematical dependencies was carried out by methods of multidimensional statistical analysis.

The method of solving the task of optimizing the cutting conditions of a part, which operates under cyclic loading conditions, was developed. The maximum productivity of the finishing turning process was used as a criterion of optimality.

In order to determine the stresses in the material of the part in the course of its operation, a finite element analysis was used. The software package FEMAP 10.2.0 from Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. was used for it.

The analysis of roughness parameters study's results showed that the smallest values of the parameters Ra , Rz and Sm correspond to the cutting condition –

$V=180$ m/min, $S=0,08$ mm/rev, $h=0,3$ mm and R_{max} – $V=120$ m/min, $S=0,1$ mm/rev, $h=0,3$ mm. The highest values of the parameters Ra , R_{max} were obtained for the cutting condition $V=80$ m/min, $S=0,12$ mm/rev, $h=0,3$ mm, Rz – $V=80$ m/min, $S=0,08$ mm/rev, $h=0,3$ mm and Sm – $V=180$ m/min, $S=0,16$ mm/rev, $h=0,3$ mm. The analysis of roughness parameters confirms the conclusion that the most informative and sensitive to changing modes of cutting conditions are Sm and R_{max} .

The determination of the metallographic properties of the samples's surface layer was carried out on polished sections. According to the values of the microhardness of the surface H_{surf} and the main material H_{main} , the degree of strengthening of plastically deformed surface layers after turning was calculated. The analysis of the obtained results showed that the highest values of the degree of strengthening of plastically deformed surface layers correspond to the cutting conditions – $V=80$ m/min, $S=0,12$ mm/rev, $h=0,3$ mm and $V=120$ m/min, $S=0,08$ mm/rev, $h=0,3$ mm, and the smallest – $V=80$ m/min, $S=0,08$ mm/rev, $h=0,3$ mm and $V=180$ m/min, $S=0,08$ mm/rev, $h=0,3$ mm.

Investigation of the influence of cutting conditions on the microstructure of near-surface layers of polished sections allowed to obtain their electronic fractography. They showed that for samples machined with cutting conditions – $V=80$ m/min, $S=0,12$ mm/rev, $h=0,3$ mm; $V=120$ m/min, $S=0,08$ mm/rev, $h=0,3$ mm; $V=180$ m/min, $S=0,12$ mm/rev, $h=0,3$ mm in the near-surface layers, the pearlite phase superior to the ferrite phase. For samples machined with cutting conditions – $V=120$ m/min, $S=0,12$ mm/rev, $h=0,3$ mm; $V=120$ m/min, $S=0,1$ mm/rev, $h=0,3$ mm; $V=180$ m/min, $S=0,1$ mm/rev, $h=0,3$ mm, the pearlite phase is less pronounced, and for samples machined with cutting conditions – $V=80$ m/min, $S=0,08$ mm/rev, $h=0,3$ mm; $V=180$ m/min, $S=0,08$ mm/rev, $h=0,3$ mm almost not visible. The results of the microstructure analysis are accepted with the above presented values of the degree of strengthening, because the pearlite is hard, ferrite is a soft phase of the metal structure.

Experimental results of the samples's surface quality parameters (surface roughness, microhardness and microstructure) made it possible to establish that each

of these parameters is sensitive to the turning cutting condition, which subsequently affects the fatigue life of the parts that work under variable loads operating conditions.

The mathematical dependences R_{max} , S_m and u_H from the turning cutting condition were obtained in order to determine the complex influence of the surface layer quality of the samples on their fatigue strength after turning by processing the results of roughness and microhardness studies. These mathematical dependences have allowed us to create a complex index of the surface layer's state of the samples $P(S, V)$, which increases with increasing feed rate and cutting speed on the studied range. This allows us to make an assumption about the corresponding increase of fatigue life.

Steel 40X samples were manufactured to study the mechanical properties of the material under static stretching. In the course of research, samples were installed in hydraulic self-centering grips of the test bench BISS Bi-01-103. The samples were being stretched at constant speed of trapping motion with the determination dependence of the sample's elongation Δl under the action of force P .

According to the results of experimental studies, the strength limit σ_b , the boundary of proportionality σ_{np} , the yield strength σ_{mek} , the elasticity modulus E , the relative narrowing ψ and the relative elongation δ of the investigated material have been determined, which made it possible to determine the conditions for conducting research on fatigue.

In order to obtain the dependence of the details material fatigue life of the cutting condition in the turning process, 40X steel samples were tested on fatigue.

Woeler curves of 40X steel specimens in symmetric load conditions using single logarithmic coordinates were constructed based on research results that made it possible to conclude that the impact of turning cutting conditions on the fatigue life of parts and the possibility of its prediction and the creation of a suitable technological support methodology.

The mathematical dependence of the fatigue life of the 40X steel part from cutting conditions and cycle stress was developed on the results of experimental

studies on fatigue and its processing. Analysis of this dependence showed that the fatigue life of turning finished specimens from steel 40X for feed rate values from 0.08 to 0.12 mm/rev, cutting speed from 80 to 180 m/min and the depth of cutting 0.3 mm increases with increasing both feed rate and cutting speed. In this case, the effect of feed rate is more significant. In this case, influence of the feed rate is more significant. This corresponds to the obtained mathematical model of the complex index of the part's surface layer and allows confirming the reliability of the fatigue life mathematical model for the 40X steel part.

The productivity of the finishing turning process was used as an optimality criterion in solving the task of technological support fatigue life of parts.

The determination of rational values of cutting speed and feed rate was carried out from the range of acceptable solutions. This range is defined by a plurality of constraints on the turning process, and also includes an operating limitation on the number of cycles before fatigue failure of the part. Thus, a turning process mathematical model of the 40X steel parts was created.

To extend the using range of the mathematical model of fatigue life on the parts, which are made from structural materials of alloyed chromium steels group, which includes steel 40X, the method of taking into account the characteristics of any material of this group is used to obtain the appropriate mathematical model of fatigue life. This allows obtaining appropriate mathematical models for any material based on the mathematical model of fatigue life for one material of the classification group without carrying out additional, long-term and expensive experimental studies.

In order to solve the task of optimizing the parts cutting conditions, the corresponding software was developed in the C # programming language.

The finite-element analysis in the framework of the software complex FEMAP 10.2.0 was carried out to determine the maximum stresses in the material of the component under conditions of its operation.

With the purpose of technological providing the necessary fatigue life of the part, taking into account the real conditions of its operation for the maximum productivity of the finishing turning process, the methodical recommendations for

determining the rational parts cutting conditions at the phase of technological preparation of production are given.

As an example of using the proposed methodical recommendations, the task of the technological support of fatigue life of the "Swing mechanism shaft" part (steel 40X GOST 4543-71), which operates under cyclic loading conditions, was solved.

The main results of the dissertation researches are tested on the example of parts, which are manufactured at PJSC "RPA " Kyiv Automatics Plant", Kyiv.

Key words: technological support, fatigue strength, fatigue life, state of the surface layer, turning process, multidimensional statistical analysis, mathematical programming.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЇХ ТОКАРНОМУ ОБРОБЛЕННІ	26
1.1. Втомне руйнування деталей в процесі експлуатації.....	26
1.2. Впливу стану поверхневого шару деталей на опір втомному руйнуванню	27
1.3. Технологічна спадковість, вплив методів та режимів різання на стан поверхневого шару	38
1.4. Обґрунтування доцільності застосування токарного оброблення для технологічного забезпечення необхідного стану поверхневого шару деталей та їх циклічної довговічності.....	41
1.5. Мета і задачі дослідження.....	43
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБРОБКИ ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ	46
2.1. Методика проведення експериментальних досліджень на втому	47
2.2. Дослідження параметрів якості поверхневого шару матеріалу деталі	50
2.3. Методика обробки результатів експериментальних досліджень	55
2.3.1. Моделювання технологічних параметрів	55
2.3.2. Стиснення масивів інформації без втрати інформативності	57
2.3.3. Порівняння досліджуваних об'єктів за їх параметрами.....	59
2.3.4. Оптимізація технологічних параметрів	60
2.4. Методика визначення експлуатаційних напружень в матеріалі деталі	64
Висновки до розділу 2	65
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТОКАРНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ОПІР ВТОМІ ДЕТАЛЕЙ.....	67
3.1. Дослідження параметрів шорсткості	67

	17
3.2. Дослідження металографічних властивостей поверхневого шару оброблених зразків	70
3.3. Дослідження механічних характеристик матеріалу при статичному розтягу.....	73
3.4. Дослідження зразків на втому	76
Висновки до розділу 3	81
РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ МАТЕРІАЛУ ДЕТАЛІ ПІСЛЯ ЇЇ ТОКАРНОГО ОБРОБЛЕННЯ.....	84
4.1. Комплексний показник стану поверхневого шару деталі від режимів токарного оброблення	84
4.2. Залежність циклічної довговічності від режимів механічного оброблення	86
4.3. Математична модель процесу токарного оброблення деталей.....	91
4.3. Математична модель процесу токарного оброблення деталей з урахуванням характеристик матеріалу деталі	101
4.4. Програма оптимізації режимів токарного оброблення.....	107
Висновки до розділу 4	111
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛІ ЇЇ ТОКАРНИМ ОБРОБЛЕННЯМ	112
5.1. Рекомендації щодо впровадження результатів досліджень	112
5.2. Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану деталей .	113
5.3. Використання методики технологічного забезпечення необхідного значення циклічної довговічності деталі «Вал» при токарному обробленні	117
Висновки до розділу 5	121
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	126
ДОДАТОК А	141
ДОДАТОК Б	196
ДОДАТОК В	199

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- N – циклічна довговічність, кількість циклів до руйнування;
- Ra – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм ;
- Rz – висота нерівностей по десяти точкам, мкм;
- R_{max} – найбільша висота профілю, мкм;
- Sm – середній крок нерівностей профілю, мм;
- V – швидкість різання, м/хв;
- S – подача, мм/об;
- h – глибина різання, мм;
- HV – твердість матеріалу по Вікерсу;
- $H_{нов.}$ – мікротвердість матеріалу на поверхні, МПа;
- $H_{осн.}$ – мікротвердість основного матеріалу, МПа.
- h_H – глибина зміцнення, мм;
- u_H – ступінь деформаційного зміцнення (наклепу), %;
- σ_s – тимчасовий опір (границя міцності), МПа;
- σ_T – границя текучості, МПа;
- $\sigma_{пл}$ – границя пропорційності, МПа;
- E – модуль пружності, МПа;
- ψ – відносне звуження, %;
- δ – відносне видовження, %;
- σ – напруження циклу, МПа;
- f – продуктивність процесу оброблення при чистовому точінні, мм/хв.;
- P_x – осьова складова сили різання, Н;
- $N_{риз}$ – ефективна потужність, що необхідна для різання, кВт;

- $N_{\text{ин}}$ – потужність, яку розвиває верстат на шпинделі, кВт;
 P_z – тангенціальна складова сили різання, Н;
 Δ_{Σ} – сумарна похибка оброблення, мкм;
 Δ_y – коливання пружних деформацій технологічної системи під дією нестабільності навантажень, що діють в системі змінної жорсткості, мкм;
 $\Delta\epsilon_y$ – похибка встановлення заготовки в пристосування, мкм;
 Δ_n – похибка налагодження технологічної системи, мкм;
 Δ_u – похибка в результаті розмірного зносу різального інструменту, мм;
 TD – величина допуску, що відповідає квалітету точності розміру, мкм.
 T – стійкість інструменту, хв;
 K_{ϵ} – відносний коефіцієнт узагальнених характеристик матеріалу;
 φ° – головний кут в плані;
 φ_1° – допоміжний кут в плані;
 γ° – передній кут;
 λ° – кут нахилу головного леза;
 r – радіус при вершині різця, мм;
 η – коефіцієнт корисної дії головного приводу верстату;
 $P_{x \text{ max}}$ – максимальне допустиме зусилля по осі X, Н;
 n_{max} – максимальна частота обертання шпинделя, об/хв;
 n_{min} – мінімальна частота обертання шпинделя, об/хв;
 S_{max} – максимальне допустиме значення подачі, мм/об;
 W_{max} – найбільша піддатливість системи, мм/кН;
 W_{min} – найменша піддатливість системи, мм/кН;
 D – діаметр оброблюваної поверхні, мм;
 D_0 – діаметр заготовки до оброблення, мм;
 l_{ϕ} – довжина оброблюваної поверхні, мм;
 L – загальна довжина проходу інструменту в напрямку подачі, мм.

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищення рівня якості продукції в приладо- та машинобудівній галузях гостро ставить задачу пошуку шляхів забезпечення її надійності. Найбільш розповсюдженою і небезпечною причиною виходу з ладу деталей приладів та машин є втомне руйнування, що нерідко призводить до тяжких наслідків, оскільки виникає раптово. До деталей, які виходять з ладу від втомного руйнування, відносяться вали, шатуни, пальці, шестерні, ротори та їх кріпильні елементи, зубчаті колеса, підшипники, диски та інші, що працюють під дією навантажень змінних за величиною та напрямком. Внаслідок цього в поверхневому шарі таких деталей виникають напруження, що є змінними в часі, і за величиною менші границі міцності. В цьому випадку в макрооб'ємі матеріал деталі деформується пружно. При пружному деформуванні достатньо великого об'єму, в мікрооб'ємах відбувається локальне знакозмінне пластичне деформування, яке називають мікропластичним. Його багаторазове повторення призводить до зародження мікроскопічних тріщин. Поступовий їх розвиток і об'єднання в магістральну тріщину призводить до послаблення перерізу і раптового долому деталей. А у валах та осях при експлуатації, навіть при постійних зовнішніх навантаженнях, виникають знакозмінні напруження згину симетричного циклу, що можуть призвести до їх втомного руйнування.

Відомо, що параметри якості поверхневого шару деталей впливають на їх опір втомі. Основними з цих параметрів є шорсткість, залишкові напруження, деформаційне зміцнення (наклеп), структурно-фазовий склад.

Оскільки при обробленні відповідальних деталей спостерігається тенденція заміни шліфування фінішною обробкою поверхонь точінням, актуальним є розв'язання задачі створення науково обґрунтованої методики технологічного забезпечення необхідних значень циклічної довговічності деталей на основі врахування впливу токарного оброблення на стан поверхневого шару деталей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі виробництва приладів і пов'язана з пошуком шляхів забезпечення експлуатаційних характеристик, якості та надійності приладів, згідно з НДР №2653-п «Розробка ефективних технологій на основі сучасних автоматизованих систем керування якістю виготовлення виробів приладобудування» ДР № 0113U002296.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є технологічне забезпечення необхідної циклічної довговічності матеріалу деталі шляхом визначення раціональних режимів токарного оброблення та розробка відповідних методичних рекомендацій.

Для досягнення сформульованої мети вирішено наступні задачі дисертаційного дослідження:

- виконати аналіз параметрів, що характеризують опір втомі деталі при циклічних навантаженнях, та методів визначення циклічної довговічності матеріалу деталі;
- провести експериментальні дослідження параметрів якості поверхневого шару та дослідження на втому зразків за різних режимів їх токарного оброблення;
- розробити математичну модель циклічної довговічності з урахуванням реальних характеристик матеріалу деталі та режимів її токарного оброблення;
- розробити математичну модель процесу фінішного токарного оброблення, що забезпечує необхідну циклічну довговічність деталі при максимальній продуктивності її фінішного токарного оброблення і враховує реальні характеристики матеріалу деталі;
- розробити алгоритм і програму визначення раціональних режимів токарного оброблення деталей, що забезпечують необхідне значення циклічної довговічності матеріалу деталі, за критерієм максимальної продуктивності;

- виконати комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану деталі, що працює в умовах знакозмінних навантажень, та на цій основі визначити раціональний режим її токарного оброблення;

- розробити методичні рекомендації використання результатів дисертаційних досліджень щодо визначення раціональних режимів токарного оброблення та виконати їх практичну апробацію при розв'язанні задач технологічної підготовки виробництва деталей.

Об'єкт дослідження: токарне оброблення деталей, що працюють в умовах змінних навантажень.

Предмет дослідження: вплив технологічних умов токарного оброблення на циклічну довговічність деталей.

Методи дослідження:

- теоретичні основи технології машинобудування, матеріалознавства та опору матеріалів;

- теоретико-експериментальне моделювання циклічної довговічності матеріалу деталей;

- експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів токарного оброблення на стан поверхневого шару та циклічну довговічність деталей;

- кінцево-елементний аналіз напружено-деформованого стану деталі при її експлуатації;

- методи багатовимірної статистичної аналізу при обробці результатів експериментальних досліджень;

- методи математичного програмування та оптимізації при визначенні раціональних режимів оброблення деталей.

Достовірність наукових припущень, положень, висновків і рекомендацій обумовлена коректним використанням фундаментальних законів опору матеріалів, теоретичних основ технології машинобудування та матеріалознавства при задовільному збігу результатів теоретичних і

експериментальних досліджень, оброблених з використанням методів багатовимірного статистичного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше отримана теоретико-експериментальна залежність циклічної довговічності деталей на прикладі групи конструкційних легованих сталей від технологічних режимів їх фінішного токарного оброблення, що дозволяє прогнозувати кількість циклів до руйнування деталі при її експлуатації під дією циклічно змінних навантажень.

2. Вперше розроблена математична модель процесу токарного оброблення, використання якої дозволяє визначити оптимальні режими фінішного оброблення, за умови забезпечення необхідної циклічної довговічності деталі при максимальній продуктивності та врахування реальних характеристик її матеріалу.

3. Встановлено закономірність впливу режимів фінішного токарного оброблення на стан поверхневого шару та циклічну довговічність деталей класифікаційної групи легованих хромистих сталей.

4. Розроблена нова методика забезпечення необхідного значення циклічної довговічності матеріалу деталі, шляхом призначення раціональних режимів її фінішного токарного оброблення.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено алгоритми та програми обробки результатів експериментальних досліджень методами багатовимірного статистичного аналізу, що дозволяють використовувати їх при проведенні різноманітних випробувань.

2. Розроблено алгоритм та програму, що дозволяють використовувати результати експериментальних досліджень, які здійснені з одним матеріалом класифікаційної групи, для множини матеріалів даної групи з урахуванням дійсних їх характеристик.

3. Створено алгоритм та програму оптимізації процесу токарного оброблення деталі, що забезпечують необхідну циклічну довговічність деталі

при максимальній продуктивності її фінішного токарного оброблення і враховують реальні характеристики матеріалу деталі.

4. Запропоновано режими фінішного токарного оброблення деталі типу «Вал», що забезпечують необхідне значення її циклічної довговічності.

5. Надано практичні рекомендації, щодо використання створеної методики технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності деталей, що працюють в умовах циклічно змінних навантажень.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, які є в дисертації, отримані автором самостійно. Постановка задачі досліджень, розробка методології та підходів до її вирішення здійснювались спільно з науковим керівником. Автору належить розробка розрахунково-експериментального підходу щодо створення математичної моделі циклічної довговічності деталі від режимів токарного оброблення та напруження циклу; створення математичної моделі процесу токарного оброблення, що включає в якості цільової функції продуктивність фінішного токарного оброблення та систему обмежень при розв'язанні задачі технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності деталей; створення методики та проведення експериментальних досліджень з визначення параметрів шорсткості поверхні, мікротвердості та структурного стану поверхневих шарів зразків. Втомні випробування зразків після їх токарного оброблення виконано спільно з працівниками кафедри динаміки, міцності машин та опору матеріалів машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Основні положення та результати дисертаційної роботи висвітлені на: 12-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів» (Ялта, 2012 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Досягнення молодих вчених в розвитку інноваційних процесів в економіці, науці, освіті» (Брянськ. Росія, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні задачі математичного моделювання та інформаційних технологій»

(Сочі, 2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Майбутній науковець – 2013» (Сєверодонецьк, 2013 р.); 7-й Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування-2014» (Мінськ, 2014 р.); III Всеукраїнській науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Львів, 2015 р.); XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2016 р.); XVI Міжнародній науково-технічній конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи» (Київ, 2017 р.); XVII Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Чернігів, 2017 р.).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 23 наукові праці, у тому числі 12 статей у наукових фахових виданнях з них 3 у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз даних та 2 статті в іноземних виданнях, 2 патенти України на корисну модель, 9 тез доповідей в збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел, що містить 130 найменувань, і додатків. Загальний обсяг роботи становить 204 сторінки машинописного тексту, у тому числі 55 ілюстрацій, 18 таблиць, список використаних джерел на 15 сторінках, 3 додатки на 64 сторінках.

РОЗДІЛ 1.

СТАН ПИТАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЇХ ТОКАРНОМУ ОБРОБЛЕННІ

1.1. Втомне руйнування деталей в процесі експлуатації

Найбільш розповсюдженою і небезпечною причиною виходу з ладу деталей машин є втомне руйнування, що нерідко призводить до тяжких наслідків, оскільки виникає раптово [1-6]. До деталей, які виходять з ладу від втомного руйнування, відносяться вали, шатуни, пальці, шестерні [2, 7], ротори центрифуг та їх кріпильні елементи [8], зубчаті колеса, підшипники, диски [9-13] та інші, що працюють під дією навантажень змінних за величиною та напрямком, внаслідок чого в них виникають напруження (за величиною менші границі міцності) змінні в часі. А у валах та осях при роботі навіть при постійних зовнішніх навантаженнях виникають знакозмінні напруження згину симетричного циклу, що можуть призвести до їх втомного руйнування. Однією з основних характеристик опору втомі деталей є циклічна довговічність, яка дозволяє визначити термін безвідмовної роботи.

Більше 70% всіх руйнувань технічних засобів пов'язано з руйнуванням від втоми. Локальні процеси зародження і початкового розвитку тріщини не здійснюють видимого впливу на деформування деталі в цілому, а прискорений розвиток тріщини, як правило, недовготривалий. В результаті долом часто відбувається раптово і стає причиною аварійних ситуацій. Таким чином, при низьких напруженнях, що відповідають багатоцикловій втомі, можливість зародження тріщини після заданого числа циклів визначається границею витривалості матеріалу і станом поверхневого шару деталі.

На опір втомі деталей впливають три основні групи факторів [14]:

— конструктивні – геометрія деталей, концентратори напружень, посадки, запас міцності, характер и спосіб прикладання навантажень;

- експлуатаційні – умови експлуатації (температура, вологість та інші фізико-хімічні властивості зовнішнього середовища), якість та періодичність змащування та ремонту, дотримання правил експлуатації виробу;
- технологічні – процес отримання необхідного металу, спосіб виготовлення заготовки, методи подальшого оброблення деталей та складання виробу.

В роботах [11, 12] представлено розподіл руйнування лопаток компресора згідно з вказаними факторами: 29% – конструктивні, 17% – технологічні, 11% – експлуатаційні, 43% – від поєднання всіх факторів. Руйнування лопаток турбіни через технологічні фактори складає 25,1%, конструктивні – 23,2%, решта 51,7% припадає на несприятливе поєднання даних факторів.

Згідно з положеннями опору матеріалів [1, 4, 5] найбільший вплив на опір втомі деталі мають її абсолютні розміри, концентрація напружень, зовнішнє середовище, частота змінних напружень та стан поверхні.

Вплив якості поверхневого шару на опір втомі пояснюється механізмом втомного руйнування, в основі якого лежить утворення і розвиток в процесі циклічного навантаження мікротріщин втомі. Тому необхідний ретельний аналіз впливу стану поверхневого шару та визначення найбільш інформативних показників.

1.2. Впливу стану поверхневого шару деталей на опір втомному руйнуванню

Із теорії різання металів [15-22] відомо, що механічне оброблення викликає пластичну деформацію, нагрівання та структурні перетворення в поверхневому шарі матеріалу оброблюваної деталі і супроводжується виникненням нерівномірних за глибиною та значенням залишкових деформацій та напружень [23-27]. В залежності від того, яке явище є домінуючим (пластична деформація, нагрівання чи структурні перетворення), поверхневий шар може відрізнятися значеннями глибини та ступеня зміцнення, величиною і

знаком залишкових напружень. Ці параметри, а також параметри шорсткості поверхні [28], в основному характеризують стан поверхневого шару і здійснюють суттєвий вплив на опір втомі деталей.

На даний час відома велика кількість наукових досліджень [9, 10, 29-32, 33-40], які підтверджують факт впливу параметрів якості поверхневого шару деталей на характеристики їх опору втомі. Як відомо, стан поверхневого шару деталей описується геометричними та фізико-хімічними параметрами. Основними з них є шорсткість, залишкові напруження, деформаційне зміцнення (наклеп), структурно-фазовий склад.

Опір втомі деталей суттєво залежить від шорсткості їх поверхонь [9, 41]. Наявність на поверхні деталей, які працюють в умовах циклічного і знакозмінного навантаження, окремих дефектів і нерівностей сприяє концентрації напружень, які можуть перевищити границю міцності. В цьому випадку поверхневі дефекти і штрихи від оброблення відіграють значну роль у виникненні субмікроскопічних порушень цілісності металу поверхневого шару і його розпушування, що є першопричиною утворення втомних тріщин.

Результати втомних випробувань [42] показали, що зразки з меншою шорсткістю ($Ra=2.04$ мкм) мають більшу циклічну довговічність ($N=4.5 \cdot 10^5$), ніж зразки з більшою шорсткістю ($Ra=3.99$ мкм, $N=3.2 \cdot 10^5$) при однаковому циклічному навантаженні.

Експериментальні дані [43] свідчать про те, що при збільшенні параметрів шорсткості відпущеної сталі 45 з $R_z = 3.2$ до $R_z = 75$ границя її витривалості знижується з 285 до 200 МПа, тобто на 30%. Особливо різко знижується границя витривалості при збільшенні шорсткості найбільш гладких поверхонь. В [43] показано вплив напрямку нерівностей на границю витривалості сталі при згинанні. При повздовжньому напрямку нерівностей циклічна довговічність при згинанні сталі 2Х13 на 10-15% вища, ніж при поперечному розташуванні нерівностей. Ця закономірність проявляється при різних видах оброблення.

Нерівності, що утворюються на поверхні внаслідок оброблення, є концентраторами напружень [33] і слугують однією з причин зниження опору втомі. Так, відповідно до даних Серенсена С.В., напруження на дні рисок в 2-2,5 рази перевищують середню величину напружень поверхневого шару. Причому концентрація напружень залежить не лише від глибини рисок, але і від їх форми. Зниження шорсткості особливо впливає на збільшення опору втомі деталей із високоміцних легованих сталей.

Експериментальне дослідження втомної міцності Філіним С.С. здійснювалося на зразках зі сталі 30ХГСА на машині МУИ-6000 з частотою прикладання навантаження 3000 цикл/хв; база випробувань – $2 \cdot 10^6$ циклів. Зразки піддавали термічному обробленню до HRC 35–37 і мали троїсто-сорбітну будову. Циліндрична поверхня зразків оброблялася круглим шліфуванням ($Ra = 0,74$) і поліруванням алмазними еластичними стрічками до $Ra = 0,22 - 0,33$. До того ж, 10 зразків полірували по 3 хв, а їх циліндричні поверхні після остаточного оброблення мали систему канавок від попереднього шліфування. Збільшення часу полірування до 5 хв. дозволило отримати поверхню без слідів від попереднього оброблення. Аналіз результатів експериментальних досліджень показує, що границя витривалості зразків при зменшенні їх шорсткості від $Ra = 0,74$ мкм до $Ra = 0,22$ мкм в середньому збільшується на 14%, а термін служби більше між в три рази. Наявність невеликих рисок ($R'_{MAX} = 1,4$ мкм) на полірованій поверхні зразків від початкового оброблення призводить до зменшення їх втомної міцності на 3–5%. Збільшення глибини цих рисок з $R'_{MAX} = 1,4$ мкм до $R'_{MAX} = 3,4$ мкм призводить відповідно зменшення втомної міцності зразків на 4%.

Дослідження Маталіна А.А. і Папшева Д.Д. свідчать про те, що опір втомі деталей залежить не тільки від величини шорсткості, але і в значній мірі від ступеня наклепу і залишкових напружень поверхневого шару.

Залишкові напруження, їх знак і глибина поширення, мають значний вплив на ресурс роботи деталей, змінюючи їх опір втомі. Це є особливо

важливим для деталей, які працюють в умовах знакозмінних навантажень. Залишкові напруження не тільки впливають на ресурс роботи деталей, але й можуть ускладнювати технологічний процес механічного оброблення, викликаючи вібрацію. Численними дослідженнями [9, 44, 45-47] встановлено, що за наявності у поверхневому шарі деталей залишкових напружень стиску опір втомі підвищується, а за наявності залишкових напружень розтягу – знижується, причому залишкові напруження стиску суттєво підвищують опір втомі, ніж знижують її такі ж за величиною залишкові напруження розтягу.

Також залишкові напруження мають суттєвий вплив на довготривалу міцність. Найбільш високі властивості довготривалої міцності мають деталі, в поверхневому шарі яких відсутні залишкові напруження та наклеп.

Вплив наклепу на опір втомі проявляється тільки до певного ступеня початкового наклепу. Якщо при попередньому обробленні поверхні ступінь пластичної деформації поверхневого шару перевищує певне для даного металу значення, то в металі починається процес його розпущення (розриви міжатомних зв'язків по площинах ковзання і субмікроскопічні порушення суцільності металу), що відбувається одночасно з процесом зміцнення, який продовжується. Це явище називається перенаклепом, яке викликає різке зниження опору втомі деталей, зносостійкості і деяких інших експлуатаційних властивостей. Отже, опір втомі деталей суттєво залежить від наклепу металу поверхневого шару. Зміцнення металу до певних меж зменшує амплітуду пластичної деформації і запобігає виникненню субмікроскопічних порушень суцільності, що породжують розвиток втомних тріщин. Крім того, створення зміцненого наклепаного поверхневого шару перешкоджає збільшенню існуючих і виникненню нових втомних тріщин. Такий шар може значно нейтралізувати шкідливий вплив зовнішніх дефектів і шорсткості поверхні.

Результати досліджень [43] показують, що при наклепі металу поверхневого шару підвищення циклічної довговічності деталей, що працюють в умовах нормальної кімнатної температури, може досягати 25–30 %. При наклепі металу, що утворюється при точінні і поліруванні границя витривалості

підвищується на 20–25 % за рахунок наклепу і на 12–15 % зростає за рахунок зниження висоти шорсткості при переході від точіння до полірування.

Важливо відмітити те, що при робочій температурі понад 700–800 °C наклеп поверхневого шару в багатьох випадках є шкідливим і знижує експлуатаційні властивості деталей. Це необхідно враховувати при обробленні жароміцних сталей і сплавів.

Дослідженнями проф. Маталіна А.А. встановлено, що залишкові напруження, зміцнення і шорсткість поверхні деталі змінюють її опір втомі у співвідношенні $1,5 \times 1,25 \times 1,03$. У відповідності з дослідженнями Сулими А.М. [9] відносна значимість кожного з параметрів якості поверхневого шару в зниженні границі витривалості зразків після шліфування складає: шорсткість поверхні до 50%; зміцнення поверхневого шару 40-45%; технологічні залишкові напруження до 5-10%. Це дозволяє зробити висновок про відсутність єдиної думки щодо ступеня впливу того чи іншого параметру на опір втомі деталей.

Структурні зміни металу при його механічному обробленні і, зокрема припали поверхонь, що шліфуються, є серйозною причиною зниження циклічної довговічності деталей. Звичайно в зонах відпущеного металу, що має менший питомий об'єм, розвиваються залишкові напруження розтягу, які знижують опір втомі деталей. При цьому на границях ділянок зміненої структури часто утворюються тріщини, які є осередком втомних руйнувань деталей. В роботі [48] описано мікроструктурні зміни в поверхневих шарах оброблених загартованих сталей, які автори називають білими та темними шарами. Перший, як правило, товщиною в кілька мікрон, є результатом мікроструктурних змін, які призводять до мартенситної структури, коли розглядається нержавіюча сталь AISI 52100. Білий шар є не бажаним при виготовленні деталей, оскільки він є твердим і крихким. Темний шар має більшу товщину (20-40 мкм, що залежить від умов технологічного процесу), є м'яким і пластичним через присутність більш загартованого мартенситу.

Оптимальним є мінімальний темний шар з твердістю не значно нижчою, ніж в об'ємі матеріалу.

Результати досліджень зразків зі сталей 20кп та 30ХГСНА [49], що піддавали фрезеруванню, чорновому та чистовому шліфуванню електрокорундовими кругами, алмазному шліфуванню, поліруванню алмазними пастами, на малоциклову втому показали, що зниження шорсткості і наявність залишкових напружень стиску суттєво збільшує довговічність сталей. Мікронерівності, наклеп та залишкові напруження впливають на малоциклову довговічність, проте характер цього впливу різний. Так, вплив величини мікронерівностей переважає лише при порівняно грубому фрезеруванні. При фінішних же методах оброблення, коли відмінність в мікрорельєфі поверхні не суттєва, більш вагомими стають наклеп і залишкові напруження.

В таблиці 1.1 [35] наведено взаємозв'язок експлуатаційних властивостей деталей та їх з'єднань з параметрами якості поверхневого шару, а також показано ступінь впливу кожного з цих параметрів. Із таблиці видно, що найбільший вплив на опір втомі мають такі параметри шорсткості як найбільша висота профілю R_{max} , середній крок нерівностей профілю S_m , при чому зі збільшення значення R_{max} опір втомі суттєво знижується, а при збільшення значень S_m – суттєво підвищується. Це обумовлено тим, що значення найбільшої висоти профілю є максимальною відстанню між лінією виступів профілю та лінією западин профілю в межах базової довжини, що, відповідно, є найбільшим концентратором напружень. На відміну від найбільшої висоти профілю, при збільшенні кроку нерівностей, напруження на дні рисок від оброблення зменшуються. Ступінь u_H та глибина h_H деформаційного зміцнення поверхневого шару деталі також є важливими, тому що збільшення їх значень підвищує опір втомному руйнуванню.

Таблиця 1.1. Параметри, що визначають експлуатаційні властивості деталей та їх з'єднань

Експлуатаційні властивості	Властивості матеріалу деталі				Параметри стану поверхневого шару																
	σ_b	σ_T	E	HB	H_{max}	H_p	Wz	Wp	Ra, Rz	R_{max}	R_p	tp	Sm	S	$\sigma_{зал}$	$h_{\sigma 0}$	u_H	h_H	ε	l_3	ρ_D
Контактна жорсткість:																					
перше навантаження	0	+	+	+	-	_*	-	_*	-	-	_*	_*	+	0	_*	0	_*	0	_*	_*	_*
повторне навантаження	0	+	-	-	_*	-	_*	-	-	-	_*	_*	_*	0	-	0	-	0	_*	_*	_*
Зносостійкість	+	+	+	+	-	_*	-	_*	-	-	_*	_*	_*	+	_*	0	_*	0	_*	_*	_*
Герметичність з'єднань	0	-	_*	-	-	_*	-	_*	-	-	_*	_*	_*	-	-	0	-	0	0	0	0
Міцність посадок	0	-	_*	-	-	_*	-	_*	-	-	_*	_*	-	0	-	0	-	0	0	0	0
Опір втомі	+	_*	+	_*	0	0	0	0	-	_*	+	-	_*	0	_*	_*	_*	_*	_*	_*	_*
Корозійна стійкість	0	0	0	0	0	0	-	-	_*	-	-	+	_*	_*	_*	+	+	+	_*	+	_*
Термостійкість	+	+	+	+	0	0	0	0	-	-	-	+	+	0	-	0	-	0	-	_*	_*

Примітка: Позначення «+» або «-» означають, що збільшення або зменшення цих параметрів викликають відповідно покращення або погіршення даної експлуатаційної властивості, «_*» – параметр здійснює основний вплив на дану експлуатаційну властивість; «0» – параметр не впливає на дану експлуатаційну властивість.

Відомі дослідження, в яких встановлено математичні залежності між границею витривалості та декількома параметрами якості поверхневого шару деталей [50]. Так, дослідженнями проф. Суліми А.М. [9] встановлена наступна залежність:

$$\sigma_{-1} = A_0 + A_1 Ra + A_2 h_H + A_3 u_H, \quad (1.1)$$

де σ_{-1} – границя витривалості; h_H, u_H – глибина та ступінь зміцнення; A_0, A_1, A_2, A_3 – коефіцієнти, що залежать від оброблюваного матеріалу і виду оброблення.

У відповідності з дослідженнями Зибеля і Гейєра границя витривалості матеріалу деталі, після механічного оброблення, визначається залежністю такого виду:

$$\sigma_{-1} = (C_1 - n \ln Rz) \sigma_{-1noc}, \quad (1.2)$$

де Rz – висота нерівностей обробленої поверхні; C_1, n – величини, що залежать від оброблюваного матеріалу і виду його термічного оброблення.

Проф. Без'язичним В.Ф. запропоновані наступні залежності між границею витривалості матеріалу деталі та параметрами якості поверхневого шару:

при точінні

$$\sigma_{-1} = m(\sigma_B / \sigma_{BE})^K Rz^{-0.05} \cdot h_H^{-0.147} \cdot \sigma_{зал.}^{-0.09}, \quad (1.3)$$

при фрезеруванні

$$\sigma_{-1} = n(\sigma_B / \sigma_{BE})^L Rz^{-0.067} \cdot h_H^{-0.139} \cdot \sigma_{зал.}^{-0.063}, \quad (1.4)$$

Де m, n, K, L – величини, що залежать від властивостей оброблюваного матеріалу; σ_B / σ_{BE} – відношення границі міцності оброблюваного матеріалу до границі міцності електротехнічної сталі, прийнятої за еталон.

Вплив залишкових напружень розтягу в поверхневому шарі на границю витривалості може бути визначена за формулою [29]:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1noc} - C \sigma_{зал. max}, \quad (1.5)$$

де σ_{-1noc} – границя витривалості полірованого зразка (без залишкових напружень); $\sigma_{зал. max}$ – значення максимальних залишкових напружень; C – коефіцієнт, що залежить від виду оброблення.

До недоліків вище описаних робіт можна віднести наступне: для визначення границі витривалості використано обмежену кількість параметрів поверхневого шару; не враховано вплив на опір втомі таких параметрів поверхневого шару як R_{max} та S_{tr} , які, відповідно до [38], мають більший вплив на значення границі витривалості, а ніж параметр R_a .

Залежності між границею витривалості матеріалу оброблюваної деталі σ_{-1OBR} та режимами механічного оброблення Урядовим С.А. [12, 25] та Водолагіним О.Л. [11] визначаються через енергетичний критерій процесу різання A [51], який характеризує роботу затрачену на зняття припуску:

$$\sigma_{-1OBR} = f(A), \quad (1.6)$$

де $A = \frac{a_1 \cdot b_1 \cdot c\rho \cdot \Theta}{P_Z}$; a_1 , b_1 – товщина та ширина шару, що зрізується; $c\rho$ – питома об'ємна теплоємність оброблюваного матеріалу; Θ – температура різання; P_Z – сила різання.

Відносна зміна модуля пружності матеріалу деталі відносно до матеріалу заготовки $E_{OBR}/E_{Поч}$ приймається за критерій пошкодженості матеріалу. Для визначення границі витривалості матеріалу деталі після оброблення пропонується наступне співвідношення:

$$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1noc}} = f\left(\frac{E_{OBR}}{E_{Поч}}\right) \quad (1.7)$$

де σ_{-1} та σ_{-1noc} – границя витривалості матеріалу деталі після оброблення і в початковому стані; E_{OBR} та $E_{Поч}$ модуль пружності матеріалу поверхневого шару деталі після оброблення і в початковому стані.

Після ряду припущень та перетворень отримано залежність між модулем пружності матеріалу деталі після оброблення та енергетичним критерієм A :

$$E_{OBR} = C \cdot A^K, \quad (1.8)$$

де C, K – коефіцієнти, що залежать від виду матеріалу та методу оброблення.

З урахуванням вище наведених формул границя витривалості матеріалу деталі після оброблення може бути визначена за формулою:

$$\sigma_{-1} = \frac{C \cdot A^K}{E_{Поч}} \cdot \sigma_{-1Поч}. \quad (1.9)$$

Значення енергетичного критерію A до виконання оброблення в [11] розраховується за наступною формулою:

$$A = \frac{1}{\frac{2,85E^{0,1}}{B^{0,43} \sin^{0,05} \alpha} + 0,6625 \frac{\Gamma D^{0,3} E^{0,175}}{B \sin^{0,165} \alpha}}, \quad (1.10)$$

де E, B, Γ, D – критерії подібності (безрозмірні комплекси), розроблені проф. Сіліним С.С. в теорії подібності процесу різання [35, 51].

Після підстановки в формулу (83) значення енергетичного критерію A з формули (84), отримано:

$$\sigma_{-1} = C \cdot \frac{\sigma_{-1Поч}}{E_{Поч}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{2,85E^{0,1}}{B^{0,43} \sin^{0,05} \alpha} + 0,6625 \frac{\Gamma D^{0,3} E^{0,175}}{B \sin^{0,165} \alpha} \right)^K}. \quad (1.11)$$

Формула (85) може використовуватися для розрахункового визначення границі витривалості з урахуванням технологічних умов обробки при точінні та циліндричному фрезеруванні [11].

Урядовим С.А. [12] отримано наступні формули для визначення границі витривалості матеріалу деталі в залежності від параметрів якості поверхневого шару для таких класифікаційних груп матеріалів:

жароміцні нікелеві сплави

$$\sigma_{-1} = 1151 Ra^{-0,2153} \cdot \sigma_{зал. max}^{-0,095} \cdot h_H^{-0,164}, \quad (1.12)$$

титанові сплави

$$\sigma_{-1} = 1465 Ra^{-0,4042} \cdot \sigma_{зал. max}^{-0,095} \cdot h_H^{-0,164}, \quad (1.13)$$

конструкційні сталі

$$\sigma_{-1} = 653 Ra^{-0.0881} \cdot \sigma_{\text{звл. max}}^{-0.095} \cdot h_H^{-0.164}. \quad (1.14)$$

Спільним недоліком робіт [11, 12] є відсутність перевірки розрахованих режимів обробки на оптимальність. Також коефіцієнти C та K є узагальненими, оскільки визначені для класифікаційних груп матеріалів, а властивості конкретного оброблюваного матеріалу не враховано.

Незважаючи на вказані недоліки, питання взаємозв'язку границі витривалості та параметрів якості поверхневого шару деталей можна вважати вивченим достатньо добре, чого не можна сказати про малоциклову втому, основною характеристикою якої є циклічна довговічність.

Розрахунок опору втомі при виготовленні відповідальних деталей стає все більш важливим в останні роки [52]. Втомна міцність гладких полірованих зразки матеріалу може бути оцінена або отримана з відповідних діаграм втоми з високою точністю. Проте, результати визначення втомної міцності на зразках не можуть бути безпосередньо застосовані до реальних деталей. Це тому, що існують різні параметри (топографія поверхні, залишкові напруження, твердість, мікроструктура тощо), які мають великий вплив на опір втомі. Автор [52] підкреслює, що вплив цих параметрів є складним і викликає труднощі в його оцінці по відношенню до опору втоми зразків. Ним запропоновані нові математичні залежності між технологічними параметрами токарного оброблення (в даному випадку подача та радіус заокруглення різальної крайки), параметрами поверхневого шару (шорсткість, залишкові напруження, мікротвердість, мікроструктура) та границею витривалості. Визначення циклічної довговічності на ділянці малоциклової втоми не розглядається.

Таким чином відомі дані про вплив стану поверхневого шару та методів оброблення на опір втомі деталей дозволяють зробити висновок, що режими механічного оброблення здійснюють значний вплив на опір втомі та, відповідно, на довговічність і надійність приладів, машин, конструкцій [14], проте не достатньо вивченими є закономірності впливу технологічних

параметрів механічного оброблення та стану поверхневого шару деталей на циклічну довговічність.

1.3. Технологічна спадковість, вплив методів та режимів різання на стан поверхневого шару

Механічне оброблення (точіння, фрезерування, шліфування, полірування тощо) є основним методом виготовлення деталей. Воно супроводжується пластичною деформацією, нагріванням та структурними перетвореннями в поверхневому шарі матеріалу оброблюваної деталі. У зв'язку з цим в процесі виготовлення деталі на її поверхні формуються нерівності, змінюється структура, фазовий та хімічний склад, виникають залишкові напруження. Зовнішній шар деталі зі зміненими структурою, фазовим та хімічним складом в порівнянні з основним металом, із якого виготовлена деталь, називається поверхневим шаром [9, 53, 54]. В поверхневому шарі (рисунок 1.1.) можна виділити наступні основні зони:

- зону 1 адсорбованих із навколишнього середовища молекул і атомів органічних та неорганічних речовин [55] (наприклад, води, СОЖ, розчинників, рідин для промивання), її товщина $1 \dots 10^2$ нм;
- зону 2 продуктів хімічної взаємодії металу з навколишнім середовищем (зазвичай оксидів), товщиною $\sim 10^{-3} \dots 1$ мкм;
- граничну зону 3 товщиною в декілька міжатомних відстаней; метал в цій зоні має інші, ніж в об'ємі, кристалічну та електронну структури;
- зону 4 зі зміненою структурою, фазовим та хімічним складом, вона виникає в процесі виготовлення та експлуатації деталі, її товщина зазвичай $\sim 0,01 \dots 0,1$ мм.

Нерівності на поверхні деталі, структура, фазовий та хімічний склад поверхневого шару впливають на її фізико-механічні та експлуатаційні властивості. Поверхневий шар здійснює суттєвий вплив на надійність роботи деталі, вузла, приладу чи машини в цілому. При експлуатації поверхневий

шар деталі піддається найбільш сильному впливу і руйнування деталі в більшості випадків починається з поверхні (наприклад, розвиток втомних тріщин, зношення, ерозія, корозія).

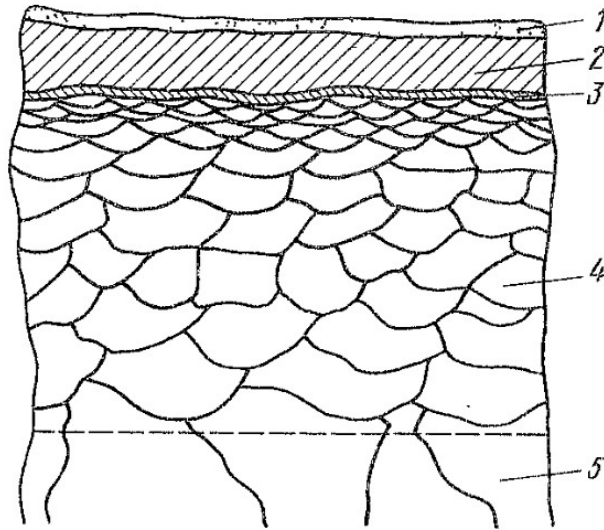


Рис. 1.1. Схема поверхневого шару деталі:

- 1 – адсорбована зона; 2 – зона оксидів; 3 – гранична зона металу;
- 4 – зона металу зі зміненою структурою, фазовим та хімічним складом;
- 5 – основний метал

Ідеально правильну поверхню неможливо отримати за допомогою будь-якого методу оброблення. Реальна поверхня деталі не досконала, проте зміна видів та режимів механічного оброблення здійснює вплив на окремі характеристики стану поверхневого шару деталей та, відповідно, і на їх експлуатаційні властивості [43, 56, 57]. Тобто існує технологічна спадковість стану поверхневого шару, а, отже, і експлуатаційних властивостей деталей, що ним визначаються, від окремих технологічних операцій і всього технологічного процесу їх виготовлення. Технологічна спадковість залежить не тільки від виду та режимів оброблення, які застосовуються на чистовій операції. Вона може проявлятися у зміні властивостей або у втраті точності форми готової деталі при її експлуатації в результаті дії тих чи інших елементів стану поверхневого шару, сформованих у поверхневому шарі деталі при її чорновому чи напівчистовому обробленні.

В [35] представлені таблиці взаємозв'язку параметрів якості поверхневого шару деталей машин з умовами їх лезвійного, алмазно-абразивного оброблення та оздоблювально-зміцнюючого обробленням поверхневим пластичним деформуванням. Аналіз даних таблиць показує, що

- макровідхиленнями найкращим чином можна керувати при обробленні різанням;
- хвилястістю – при алмазно-абразивному та оздоблювально-зміцнюючому обробленні;
- параметрами шорсткості – при всіх методах оброблення;
- фізико-механічними властивостями поверхневого шару – при оздоблювально-зміцнюючому обробленні поверхневим пластичним деформуванням.

При лезвійному обробленні основний вплив здійснюють: на точність розмірів і макровідхилення деталей – точність станка, жорсткість технологічної системи та матеріал різальної частини інструмента; на хвилястість – жорсткість системи і точність станка; на параметри шорсткості – подача; на фізико-механічні властивості – СОТС, геометрія різальної частини інструмента і режими оброблення.

В [58] розглядається вплив параметрів високошвидкісного різання на параметри якості поверхонь деталей зі сплаву Інконель 718. Дослідження проводились при безперервному високошвидкісному точінні за різних значень параметрів процесу різання. Швидкість різання змінювалася з 40 до 60 м/хв, подача – з 0,02 до 0,09 мм/об, глибина різання становила 0,5 мм. Аналіз мікроструктури та зміцнення поверхні показав, що кінетика пластичної текучості сплаву Інконель 718 суттєво залежить від умов різання. Мікроструктурний аналіз оброблених поверхонь та стружки встановив зміни фазового стану як результат «сухого» різання. Встановлено, що аустенітна фаза впливає на глибину пластично деформованої зони під обробленою поверхнею. Ступінь та глибина наклепу можуть бути зменшені за допомогою використання належно оптимізованих параметрів процесу різання під час

високошвидкісного оброблення. Також, при обробленні вище згаданого матеріалу встановлено [42], що при збільшенні подачі від 0,08 до 0,16 мм/об шорсткість поверхні зменшується. А подальше збільшення подачі до 0,25 мм/об призводить до збільшення шорсткості.

Найбільш важливі параметри механічного оброблення, які впливають на шорсткість поверхні розглядаються в [59-65]. В роботі [66] представлено дослідження впливу технологічних параметрів процесу різання на глибину поверхневого зміцнення деталей. Також розроблено розрахункову модель для їх визначення. В статті [67] досліджується вплив параметрів високошвидкісного оброблення на стан оброблених поверхонь, а саме на шорсткість поверхні та залишкові напруження.

Таким чином, прояв технологічної спадковості може призвести як до покращення, так і до погіршення експлуатаційних властивостей деталей. Для доцільного використання явищ технологічної спадковості необхідно встановити безпосередні зв'язки між циклічною довговічністю і режимами оброблення деталей при основних методах їх виготовлення.

1.4. Обґрунтування доцільності застосування токарного оброблення для технологічного забезпечення необхідного стану поверхневого шару деталей та їх циклічної довговічності

Виготовлення багатьох відповідальних деталей вимагає зазвичай після здійснення чорновий, напівчистових і чистових переходів при точінні чи фрезерування проведення шліфування, полірування чи навіть певного специфічного оброблення. Іншими словами, виробництво таких деталей є досить дорогокоштуючим. Одним з можливих способів зниження вартості [46] є ліквідація однієї або декількох фінішних операцій і в даний час виконується значна кількість досліджень в цьому напрямку. Звичайно використання токарного або фрезерного оброблення в якості кінцевої

фінішної операції є часто проблемним, але застосовується все частіше у зв'язку із застосуванням нових інструментальних матеріалів [46, 68-73].

Фінішне оброблення деталей із загартованої сталі (наприклад, загартованої сталі AISI 52100 для підшипників і загартованої сталі 16MnCr5 для автомобільних зубчастих коліс і валів) точінням інструментами із надтвердих різальних матеріалів (ПКНБ, кераміка і т.д.) має зростаючий інтерес в останні роки в промисловості [46]. Точіння розглядаються як альтернативу традиційному чистовому шліфуванню через високу гнучкість, здатність досягти більш високих швидкостей знімання металу, можливість роботи без використання охолоджуючих рідин, а також можливість досягнення такої ж якості поверхонь оброблюваної деталі.

При обробленні точінням та шліфуванням можна отримати наклеп та залишкові напруження стиску або розтягу різної інтенсивності та глибини [73]. Швидкісне різання дає залишкові напруження стиску, а силове розтягу; шліфування корундовими кругами – розтягу, а алмазними стиску. До того ж при точінні, як і при механоультразвуковому, електороерозійному та лазерному обробленні можна отримати так звані «білі» шари на поверхні металу, які значно підвищують корозійно-механічну міцність, зносостійкість та інші експлуатаційні характеристики. При таких видах оброблення відбувається імпульсне нагрівання при значних швидкостях відведення тепла і дифузії вуглецю, хрому, нікелю та інших елементів із внутрішніх шарів металу до його поверхні, що призводить до зміни їх механічних властивостей та підвищення опору втомі.

Результати використання надтвердого інструментального матеріалу гексаніт-Р [24, 74, 75] при токарному обробленні сталі ХВГС (HRC 54...56) у порівнянні зі шліфуванням зразків абразивними кругом показали, що при випробуванні на втому обмежена границя витривалості на 30 % більша для зразків після токарного оброблення гексанітом-Р. Це пов'язано з тим, що даний інструментальний матеріал має високу теплопровідність, яка сприяє утворенню залишкових напружень стиску.

При обробленні нержавіючих сталей [76, 77] встановлено, що мікронерівності глибиною до 5 мкм після токарного оброблення можуть бути скомпенсовані за рахунок формування залишкових напружень стиску. В цьому відношенні токарне оброблення стає більш сприятливим ніж шліфування по відношенню до опору втомі деталей.

Враховуючи вище вказане можна стверджувати, що токарне оброблення дозволяє отримувати деталі з високими якісними характеристиками поверхневого шару [78], а отже, і експлуатаційними характеристиками. Таким чином, актуальним є керування технологічною спадковістю при токарному обробленні [79], основним носієм якої є поверхневий шар деталі, з метою забезпечення необхідної циклічної довговічності деталей.

1.5. Мета і задачі дослідження

Проведений аналіз показав, що результати значної кількості наукових робіт в більшості випадків мають обмежене використання у зв'язку зі складністю розгляду широкого спектру конструкційних матеріалів, які використовуються в машино- та приладобудуванні. Проблемним також є вибір умов механічного оброблення деталей, що забезпечують необхідні значення циклічної довговічності деталей. На сьогодні тільки для деяких конструкційних матеріалів існують математичні залежності характеристик опору втомі від параметрів якості поверхневого шару деталі. Це не дозволяє забезпечувати циклічну довговічність деталі на стадії технологічної підготовки її виготовлення.

В той же час, інтенсифікація технологічних процесів, скорочення термінів технологічної підготовки виробництва, постійне підвищення вимог до якості продукції (особливо до відповідальних деталей, що працюють в умовах знакозмінних навантажень) вимагає розв'язання задачі технологічного забезпечення циклічної довговічності деталі та підвищення

продуктивності її виготовлення шляхом оптимізації режимів механічного оброблення.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є технологічне забезпечення необхідної циклічної довговічності матеріалу деталі шляхом визначення раціональних режимів токарного оброблення та розробка відповідних методичних рекомендацій.

Для досягнення сформульованої мети вирішено наступні задачі дисертаційного дослідження:

- виконати аналіз параметрів, що характеризують опір втомі деталі при циклічних навантаженнях, та методів визначення циклічної довговічності матеріалу деталі;

- провести експериментальні дослідження параметрів якості поверхневого шару та дослідження на втому зразків за різних режимів їх токарного оброблення;

- розробити математичну модель циклічної довговічності з урахуванням реальних характеристик матеріалу деталі та режимів її токарного оброблення;

- розробити математичну модель процесу фінішного токарного оброблення, що забезпечує необхідну циклічну довговічність деталі при максимальній продуктивності її фінішного токарного оброблення і враховує реальні характеристики матеріалу деталі;

- розробити алгоритм і програму визначення раціональних режимів токарного оброблення деталей, що забезпечують необхідне значення циклічної довговічності матеріалу деталі, за критерієм максимальної продуктивності;

- виконати комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану деталі, що працює в умовах знакозмінних навантажень, та на цій основі визначити раціональний режим її токарного оброблення;

- розробити методичні рекомендації використання результатів дисертаційних досліджень щодо визначення раціональних режимів токарного

оброблення та виконати їх практичну апробацію при розв'язанні задач технологічної підготовки виробництва деталей.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБРОБКИ ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для вирішення поставлених задач дисертаційних досліджень, розглядається методика виконання таких експериментальних досліджень:

- конструкційного матеріалу на втому;
- параметрів якості поверхневого шару деталі;
- мікроструктурного аналізу оброблених поверхонь;

Обробка результатів проведених експериментальних досліджень здійснювалась шляхом використання методів багатовимірної статистичної аналізу та нелінійного математичного програмування.

Основні теоретичні дослідження, експериментальні та розрахункові роботи виконувались на кафедрі виробництва приладів приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Дослідження механічних та втомних характеристик матеріалів здійснювали на кафедрі динаміки, міцності машин та опору матеріалів маханіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Визначення мікротвердості виконували в лабораторії мікромеханічних випробовувань, мікроструктури центру електронної мікроскопії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

В якості досліджуваного матеріалу вибрано конструкційну леговану хромисту сталь 40Х ГОСТ 4543-71, оскільки з цього матеріалу виготовляються вали, шатуни, пальці, шестерні, ротори та їх кріпильні елементи, зубчасті колеса, підшипники, диски та інші деталі, що піддаються

вібраційним та динамічним навантаженням. Тому до таких деталей пред'являються вимоги підвищеної міцності, в'язкості та довговічності.

2.1. Методика проведення експериментальних досліджень на втому

Для дослідження впливу технологічних умов токарного оброблення на зміну втомних характеристик використовували гладкі зразки круглого перерізу типу I (рис.2.1) згідно з ГОСТ 25.502-79 [80].

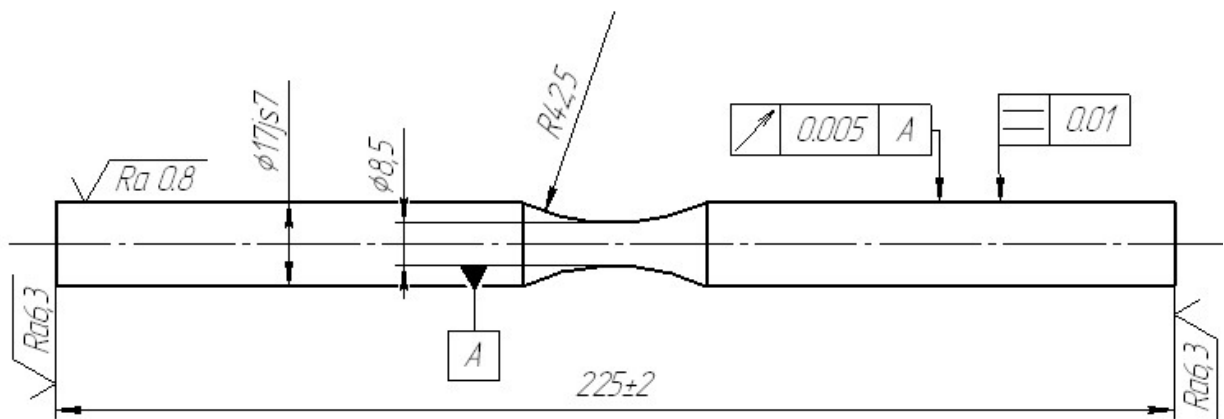


Рис. 2.1. Ескіз зразку для випробувань на втому

Формування робочої частини зразків здійснювали в декілька етапів. Спочатку виконували токарне оброблення поверхні зразка з припуском на заключний чистовий токарний перехід. На наступному етапі з метою видалення рисок на поверхні зразків від попереднього токарного оброблення та округлення гострих крайок здійснювали їх шліфування та механічне полірування. Після цього для зняття наклепу зразки піддавали термічному обробленню. Термічне оброблення виконували в середовищі захисного газу для недопущення окиснення поверхонь за такого режиму: нагрів до температури 450°C, витримка 2 години та охолодження в печі.

Чистове оброблення зразків виконували з трьома режимами в діапазоні швидкостей різання від 80 до 180 м/хв та подач – з 0,08 до 0,12 мм/об при глибині різання 0,3 мм. Режими оброблення трьох груп зразків наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Режими токарного оброблення зразків

№	Режими обробки		
	V , м/хв	S , мм/об	h , мм
1	120	0,12	0,3
2	80	0,08	0,3
3	180	0,08	0,3

Токарне оброблення виконували на токарному оброблюваному центрі HAAS ST20 (рис. 2.2) різцем PVVNN 2525M-16Q з різальною пластинкою VBGW 160404T00815SE без охолодження.



Рис. 2.2. Загальний вигляд токарного оброблюваного центру HAAS ST20

З теорії опору матеріалів відомо [4, 5, 8, 81, 82], що багатоциклова втома матеріалів характеризується напруженнями, що не перевищують границю пропорційності. Тому з метою визначення механічних характеристик матеріалу та зменшення кількості досліджень на втому проводили випробування при статичному розтягу. Дослідження виконували у відповідності з ГОСТ 1497-84 [83]. Для цього розроблено ескіз зразку, що наведений на рис. 2.3, для проведення досліджень на випробувальному стенді BISS Bi-01-103 (рис. 2.4).

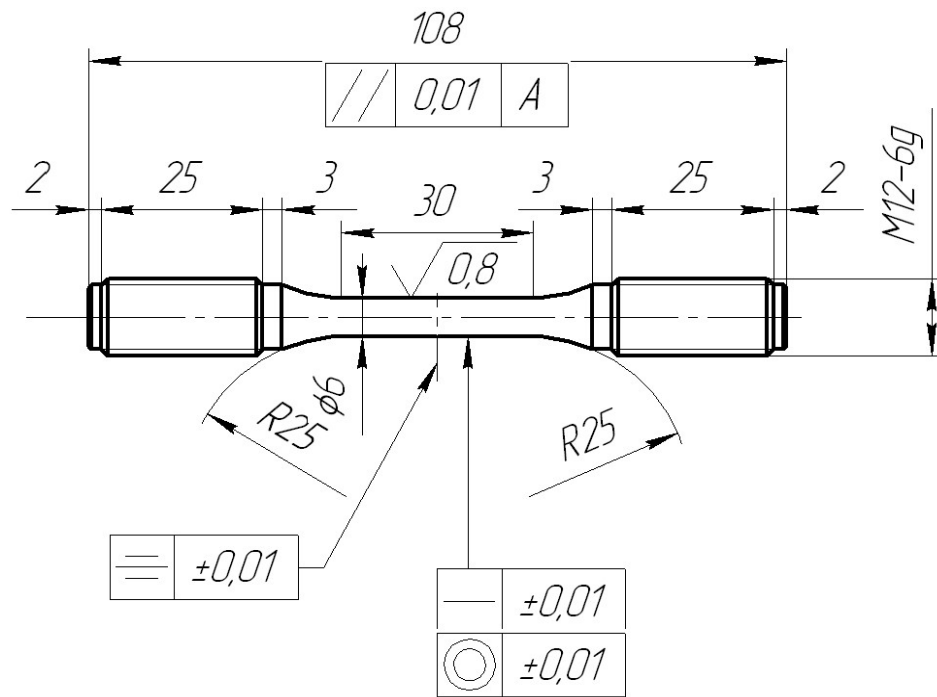


Рис. 2.3. Ескіз зразку для випробувань при статичному розтягу

Дослідження на розтяг проводили із постійною швидкістю переміщення активного рухомого захвату з записом діаграм деформування.



Рис. 2.4. Загальний вигляд випробувального стенду BISS Vi-01-103

Для проведення експериментальних досліджень на втому відповідно до ГОСТ 25.502-79 [80] обрано схему навантаження: чистий згин при обертанні зразка, яка зображена на рис. 2.5.

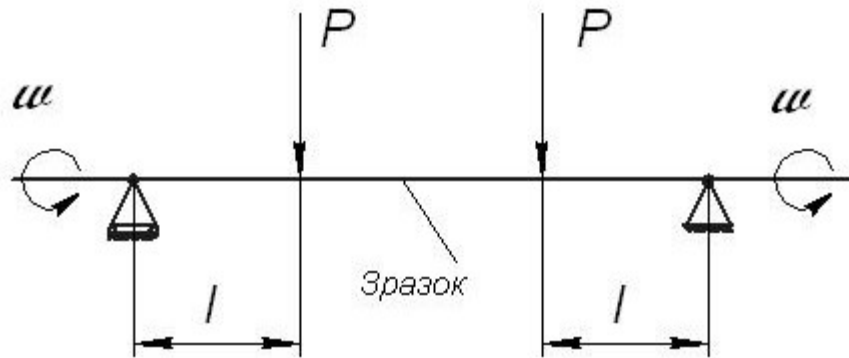


Рис. 2.5. Схема навантаження зразка при проведенні випробувань на втому

На рис. 2.5 використано такі позначення: P – навантаження, Н; ω – частота обертання зразка, об/хв; l – відстань від опори до місця прикладання зусилля.

Випробування зразків на втому виконували на базі $N = 2 \cdot 10^7$ циклів при температурі 20°C за частоти обертання 2000 об/хв на випробувальній машині МУИ-6000 (рис. 2.6). На рис. 2.7 наведено схему випробувальної машини.



Рис. 2.6. Загальний вигляд випробувальної машини МУИ-6000

2.2. Дослідження параметрів якості поверхневого шару матеріалу деталі

В цих дослідженнях здійснювали вимірювання таких параметрів якості поверхневого шару деталі: показники шорсткості, мікротвердість та мікроструктура.

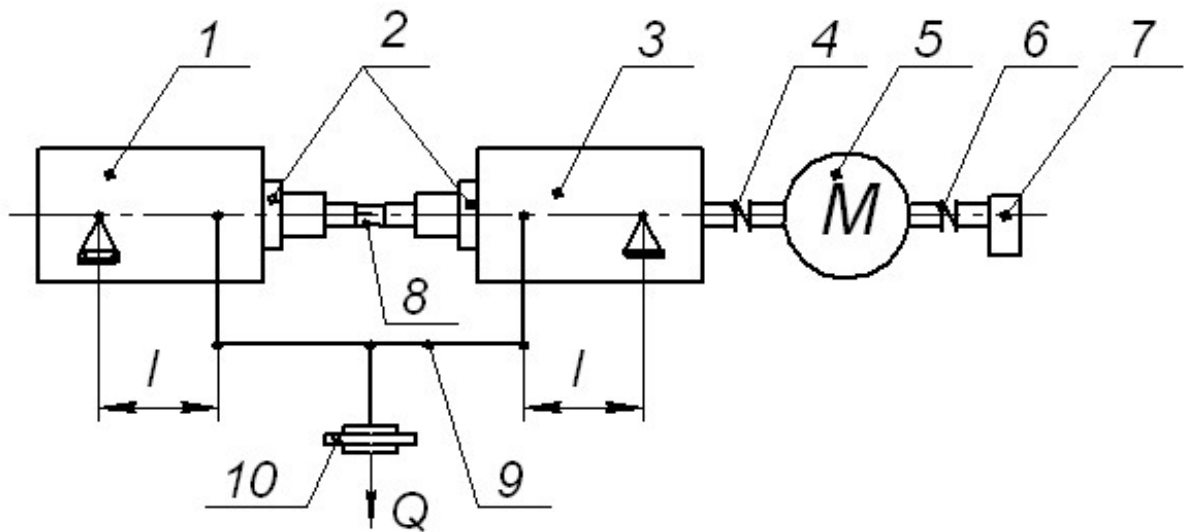


Рис. 2.7. Схема випробувальної машини МУИ-6000:

- 1 – рухомий захват; 2 – цанги; 3 – нерухомий захват; 4 – муфта;
 5 – електродвигун; 6 – муфта; 7 – лічильник циклів; 8 – зразок;
 9 – важільна система навантаження; 10 – вантаж, Q – вага підвішеного
 вантажу; l – відстань від опори до місця прикладання зусилля

З метою визначення параметрів шорсткості досліджуваних зразків, що оброблені на різних режимах токарного оброблення в діапазоні швидкостей різання від 80 до 180 м/хв. та подач – з 0,08 до 0,16 мм/об при глибині різання 0,3 мм, виконували необхідні вимірювання з використанням приладу MarSurf PS1 згідно [84]. Загальний вигляд приладу наведено на рис. 2.8. Максимальний діапазон вимірювань приладу складає 350 мкм (від -200 мкм до +150 мкм), а максимальна мірна довжина 17,5 мм. Для всіх вимірювань довжина вимірювання складала 3,5 мм, налаштування приладу: L_t 1.75 mm; L_c 0.25 mm; n 5. Де L_t – мірна довжина; L_c – довжина відрізків вибірок довжин, n – кількість вибірок довжини. Для вимірюванні вибрано параметри шорсткості R_{max} та S_m , як такі, що мають найбільший вплив на втомні характеристики матеріалів [9, 38]. Також здійснювали вимірювання параметрів R_a та R_z .



Рис. 2.8. Загальний вигляд приладу для вимірювання шорсткості MarSurf PS1

Мікротвердість вимірювали у відповідності з [85] за Вікерсом на мікротвердомірі ПМТ-3. Загальний вигляд приладу представлено на рис. 2.9. Для оцінки мікротвердості тонких поверхневих шарів навантаження на індентор складало 0,1 Н за тривалості прикладання зусилля – 10 с. Вимірювання виконували в напрямку від місця виходу зразка на поверхню до основного матеріалу.

Величину мікротвердості розраховували за формулою:

$$HV = 1.854 \frac{P}{d^2}, \quad (2.1)$$

де P – навантаження, Н; d – довжина діагоналі відбитку алмазної пірамідки, мм.

Для оцінки глибини та ступеня зміцнення поверхні використовували метод вимірювання мікротвердості на косих шліфах (рис.2.10).

Досліджували матеріал на ділянці косого шліфу, що розташований під кутом $4-6^\circ$ до поверхні. Із досліджуваного матеріалу виготовляли зразки висотою 5 мм та діаметром 10 мм, циліндричну поверхню яких оброблювали за режимів, де швидкість різання варіювалася від 80 до 180 м/хв., подача – від 0,08 до 0,12 мм/об при глибині різання 0,3 мм.



Рис. 2.9. Загальний вигляд мікротвердоміру PMT-3



Рис. 2.10. Загальний вигляд косих шліфів досліджуваного матеріалу

Косі шліфи виготовляли в лабораторії підготовки шліфів (пробопідготовки) інженерно-фізичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». З метою попередження завалу краю досліджуваного зразка виконували його гаряче запресовування за допомогою пресу фірми Buehler (рис.2.11) з використанням бакеліту при температурі 150 °C та тиску 150 Бар. Шліфування виконували на шліфувально-полірувальному верстаті фірми Buehler папером для шліфування P350, P600, P800, P1200, P2500 при швидкості обертання 300 об/хв та тиску 25 Н. Полірування виконували з використанням фетру та суспензії Al_2O_3 при швидкості обертання 10 об/хв та тиску 20 Н.

Глибину зміцненого шару визначали за стабілізацією вимірних значень мікротвердості. При цьому поточне значення відстані від поверхні до точки вимірювання мікротвердості h_i , мкм розраховували за формулою:



Рис. 2.11. Загальний вигляд зразків,
що підготовлені для запресування на пресі

$$h_{Hi} = l_i \sin \alpha \quad (2.2)$$

де α – кут нахилу мікрошліфу; l_i – відстань від поверхні до точки вимірювання мікротвердості, мкм.

Наклеп характеризується глибиною пластично деформованого шару і ступенем зміцнення, що визначається за формулою:

$$u_H = \frac{H_{нов.} - H_{осн.}}{H_{осн.}} \cdot 100 \% \quad (2.3)$$

де $H_{нов.}$ – мікротвердість матеріалу на поверхні, МПа; $H_{осн.}$ – мікротвердість основного матеріалу, МПа.

З метою визначення впливу режимів токарного оброблення на мікроструктуру матеріалу зразків виконували металографічні дослідження на мікрошліфах з використанням скануючого електронного мікроскопу з енергодисперсійним мікроаналізатором РЕМ 106И (рис. 2.12.). При цьому мікрошліфи попередньо травили 6% розчином соляної кислоти.



Рис. 2.12. Загальний вигляд скануючого електронного мікроскопу з енергодисперсійним мікроаналізатором РЭМ 106И

Таким чином розроблено методику та вибрано необхідне обладнання для проведення досліджень стану повеневого шару зразків.

2.3. Методика обробки результатів експериментальних досліджень

Обробка експериментальних досліджень здійснюється з метою отримання математичних моделей досліджуваних параметрів та визначення вихідних змінних, що забезпечують мінімальне (максимальне) значення вибраному критерію оптимальності.

2.3.1. Моделювання технологічних параметрів

Аналіз методів отримання математичних моделей на основі результатів проведених експериментальних досліджень показав, що для цього доцільно використовувати багатофакторний регресійний аналіз даних. Цей метод на основі статистичного матеріалу дозволяє кількісно оцінити зв'язки між вихідними параметрами та змінними (факторами) [86] й отримати адекватну математичну модель досліджуваного процесу.

Розроблено алгоритм багатофакторного регресійного аналізу даних, схема якого представлена на рис. 2.13. Даний алгоритм програмно реалізований та апробований при розв'язанні задач моделювання

технологічних параметрів. В додатку А наведено текст програми, що реалізує багатофакторний регресійний аналіз даних.

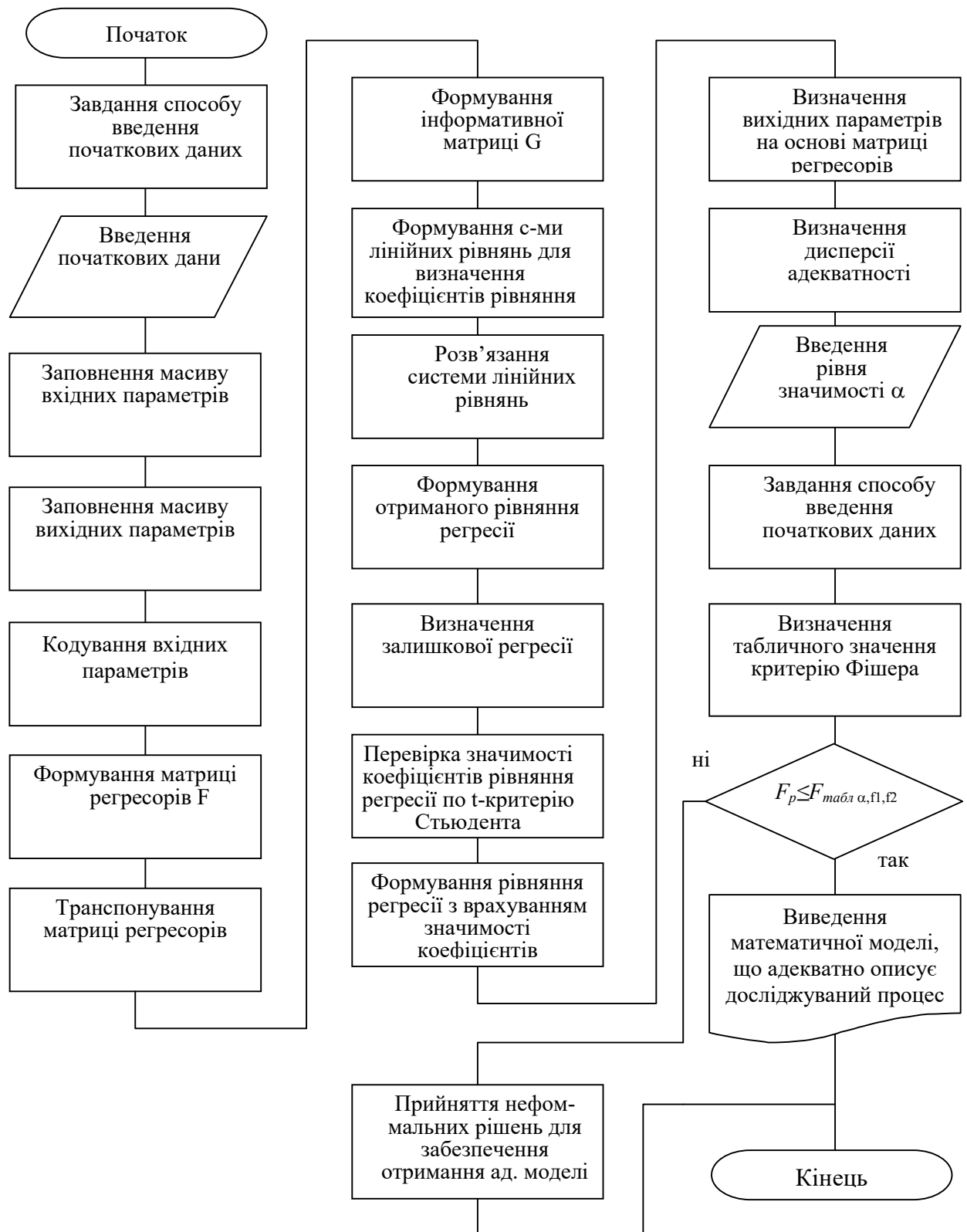


Рис. 2.13. Алгоритм методу багатофакторного регресійного аналізу даних

2.3.2. Стиснення масивів інформації без втрати інформативності

Дослідження конструкційних матеріалів на втому передбачає використання інформаційних масивів великої розмірності, що включають хімічний склад, фізико-механічні характеристики матеріалів, умови оброблення тощо. Для спрощення алгоритмів обробки інформації та збільшення точності обчислень доцільно стиснути масиви початкових даних без втрати їх інформативності.

З цією метою пропонується використовувати методику багатовимірного статистичного аналізу даних, що реалізована у вигляді факторного аналізу.

Суть факторного аналізу полягає в тому, щоб представити j -ті параметри (властивості) i -го об'єкта x_{ij} у вигляді l схованих гіпотетичних факторів F . Найпростішою моделлю для опису факторів, що характеризують кожен об'єкт, може служити лінійна модель:

$$F_{il} = a_{i1}y_{i1} + a_{i2}y_{i2} + \dots + a_{ij}y_{ij} + \dots + a_{kn}y_{mn};$$

$$\begin{aligned} j &= 1, 2, 3, \dots, n; \\ i &= 1, 2, 3, \dots, m; \\ l &= 1, 2, 3, \dots, k; \\ k &< n, \end{aligned} \quad (2.4)$$

де y_{ij} – нормоване значення j -тої властивості I -го об'єкту властивості;
 a_{ij} – вклад (навантаження) l -ої латентної змінної в j -ту властивість об'єкту.

На основі методик, що викладені в роботах [87-93] розроблено алгоритм факторного аналізу, що наведений на рис. 2.14. Цей алгоритм програмно реалізовано і апробовано при обробці різноманітної масивів технологічної інформації. Текст програми наведено в додатку А.

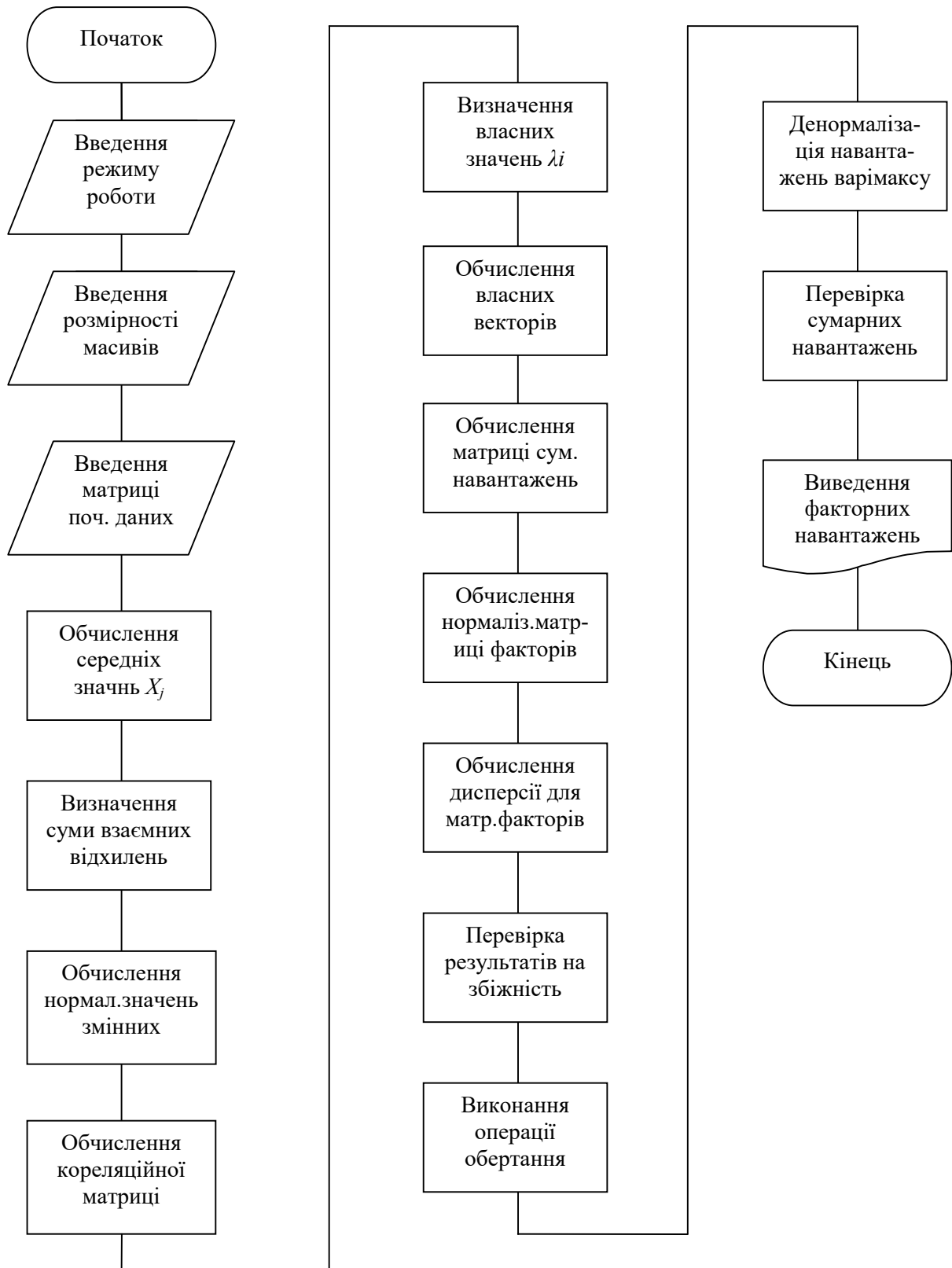


Рис. 2.14. Узагальнена схема алгоритму факторного аналізу даних

2.3.3. Порівняння досліджуваних об'єктів за їх параметрами

Втомні випробування вимагають довготривалих досліджень, тому доцільно провести експерименти з використанням еталонного матеріалу, а їх результати адаптувати до інших матеріалів на основі комплексного порівняння властивостей досліджуваного і еталонного матеріалу. Для цього пропонується така порівняльна методика [94-98].

Нехай будь який i -тий досліджуваний об'єкт, $i = 1, 2, 3, \dots, m$ характеризується своїми параметрами (властивостями) K_{il} , $l = 1, 2, 3, \dots, k$. При цьому параметри об'єкту мають власний ваговий коефіцієнт D_{il} , що представляю собою вклад l -ї властивості i -го об'єкта.

Тоді для порівнювального оцінювання об'єктів спочатку для кожного із них визначається допоміжний параметр K_{mil} як:

$$K_{mil} = 1 - \frac{K_{il} - K_{i\text{сеп}}}{K_{i\text{max}} - K_{i\text{min}}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad l = 1, 2, 3, \dots, k, \quad (2.5)$$

де $K_{i\text{сеп}}$, $K_{i\text{max}}$, $K_{i\text{min}}$ – відповідно середнє, найбільше та найменше значення l -го параметра i -го об'єкта.

Після обчислення K_{mil} визначаються для всіх досліджуваних об'єктів коефіцієнти KD_i та сумарний ваговий коефіцієнт об'єктів SD_i за формулами:

$$KD_i = \sum_{l=1}^k K_{mil} D_{il} \quad (2.6)$$

та
$$SD_i = \sum_{l=1}^k D_{il} . \quad (2.7)$$

Коефіцієнт узагальнених властивостей кожного досліджуваного об'єкта K_{mi} визначається як:

$$K_{mi} = \frac{KD_i}{SD_i} . \quad (2.8)$$

Для порівняльної оцінки властивостей досліджуваних об'єктів з його переліку вибирається еталонний об'єкт. Відношення коефіцієнтів узагальнених властивостей досліджуваного та еталонного об'єктів вказує на відмінність їх параметрів.

2.3.4 Оптимізація технологічних параметрів

Згідно з задачею дисертаційних досліджень необхідно визначити раціональні режими фінішного токарного оброблення деталей, що забезпечують необхідне значення циклічної довговічності матеріалу деталі при максимальній продуктивності процесу фінішного токарного оброблення.

В загальному вигляді задача оптимізації представляє собою багатовимірну задачу математичного програмування, де цільова функція та обмеження є нелінійними відносно оптимізуючих змінних.

Аналіз методів оптимізації технологічних параметрів [99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111] показав, що для розв'язання такої задачі доцільно використовувати метод ковзаючого допуску.

Метод ковзаючого допуску [86] належить до методів, що дозволяють розв'язати задачу нелінійного програмування, яка формулюється наступним чином: мінімізувати цільову функцію $f(X)$, $X \in E^m$ при таких припущеннях:

$$\begin{aligned} h_i(X) &= 0, i = 1, 2, \dots, n; \\ g_j &\geq 0, j = m + 1, m + 2, \dots, l, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де функції $f(X)$, $h(X)$ і $g(X)$ можуть бути як лінійними, так і нелінійними.

Для розв'язання такої задачі систему обмежень (2.9) запишемо в такому виді:

$$\Phi^k - T(X) \geq 0, \quad (2.10)$$

де Φ^k – значення критерію ковзаючого допуску на кожному етапі пошуку;

$T(X)$ – функціонал над множиною всіх обмежень, що представлені співвідношеннями (2.9).

Функція $\Phi^k = \Phi^k(X_{1,\dots}^k, X_{2+2,\dots}^k)$ є критерієм для визначення моменту закінчення пошукової процедури. Одним із варіантів вибору Φ^k може бути така залежність:

$$\Phi^k = \min \left\{ \Phi^{(k-1)}, \frac{n+1}{r+1} \sum_{i=1}^{r+1} \|X_i^k - X_{r+2}^k\| \right\}, \quad (2.11)$$

$$\Phi^0 = 2(n+1)t,$$

де t – розмір початкового многогранника;

n – кількість обмежень у вигляді рівнянь;

$r = (-n + m)$ – кількість степенів вільності цільової функції $f(X)$;

$X_{r+2}^k = \frac{1}{r} \left[\left(\sum_{i=1}^{r+1} X_{ji}^k - X_{nj}^k \right) \right]$ – вектор, що визначає координати центру тяжіння многогранника при $m = r$.

Функція Φ^k є позитивною зменшувальною функцією, яка створює послідовність $\Phi^0 \geq \Phi^1 \geq \dots \geq \Phi^k \geq 0$, тобто $\lim_{k \rightarrow \infty} \Phi^k = 0$.

Функціонал $T(X)$ над множиною обмежень (2.10) представляється формулою:

$$T(X) = \left[\sum_{i=1}^n h_i^2(X) + \sum_{i=n+1}^l U_i g_i^2(X) \right]^{1/2}, \quad (2.12)$$

де U_i – оператор Хевісайда, що визначається наступним чином:

$$U_i = \begin{cases} 0, & \text{при } g_i(X) \geq 0, \\ 1, & \text{при } g_i(X) < 0. \end{cases} \quad (2.13)$$

Тобто $T(X)$ – це взятий з додатнім знаком квадратний корінь із суми порушених обмежень (2.9), $T(X) \geq 0$ в E^m . Вектор X^k – є допустимим, якщо $T(X^k) = 0$, майже допустимим, якщо $0 \leq T(X^k) \leq \Phi^k$ та недопустимим, якщо $T(X^k) > \Phi^k$. Величина початкового многогранника визначається виразом:

$$t = \min \left\{ \left[\frac{0,2}{m} \sum_{i=1}^m (U_i - L_i) \right], (U_2 - L_2), \dots, (U_n - L_n) \right\}, \quad (2.14)$$

де $(U_i - L_i)$ – різниця між верхніми та нижніми граничними значеннями, які може приймати X^i .

Робота алгоритму оптимізаційного пошуку закінчується в двох випадках. Якщо $\Phi^k \leq \varepsilon$, то пошук вважається закінченим і кваліфікується як успішний.

У випадку, коли не вдається знайти допустиму точку або майже допустиму точку за допомогою мінімізуючої функції $T(X)$, то пошук завершується і виконується заміна початкової точки X^0 та (або) здійснюється перехід до іншого набору значень параметрів α, β, γ та ε . Зазвичай рекомендується приймати такі значення цих параметрів: $\alpha = 1; \beta = 0,5; \gamma = 2; \varepsilon = 10^{-5}$.

Для пошуку допустимих або майже допустимих точок при мінімізації $T(X)$ використовується алгоритм Нелдера і Міда, що має назву деформованого многогранника.

Розроблено алгоритм розв'язання задачі багатовимірної нелінійної оптимізації, що використовує метод ковзаючого допуску. Узагальнена схема цього алгоритму наведена на рис. 2.15.

При практичній реалізації на ЕОМ багатьох методів нелінійного програмування значна доля машинного часу витрачається на те, щоб забезпечити суворе виконання умов допустимості. Алгоритм ковзаючого допуску дозволяє покращити значення цільової функції як за рахунок інформації, що утримується в допустимих точках простору рішень, так і за рахунок інформації, яку вдається одержати при проходженні через деякі точки, що лежать зовні допустимої області, але є близькими до допустимих. Інтервали, в межах яких точки можна вважати майже допустимими, в ході оптимізаційного пошуку поступово скорочуються так, що в границі (по мірі наближення до рішення задачі нелінійного програмування) в системі співвідношень (2.9) враховуються тільки допустимі точки X .

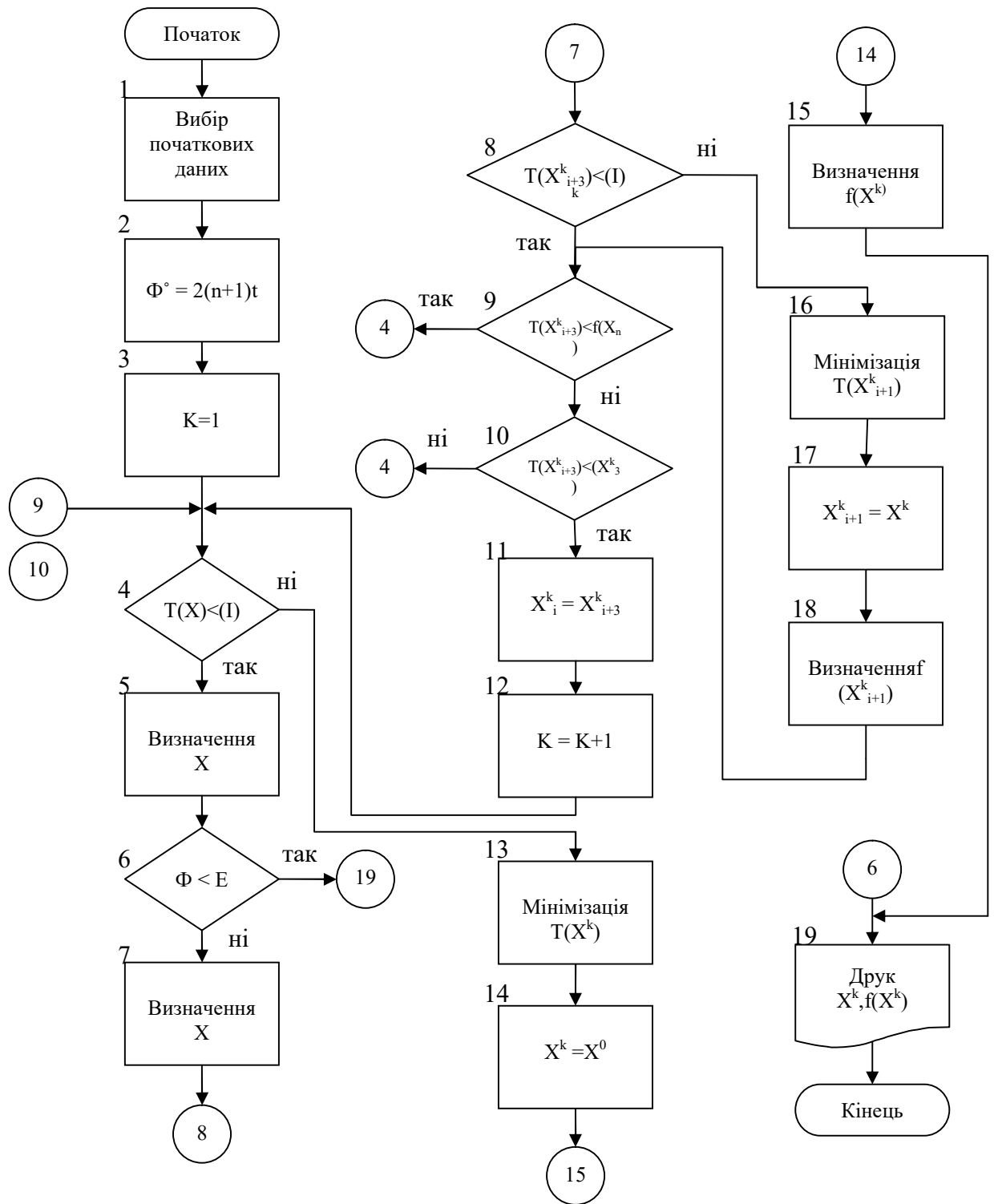


Рис 2.15. Узагальнена схема алгоритму оптимізації методом ковзаючого допуску

При такій стратегії оптимізаційного пошуку задача (2.9) замінюється більш простою задачею (2.10). Таким чином, при рішенні такої задачі безумовної мінімізації досягається висока ступінь ефективності обчислювальних процедур.

2.4. Методика визначення експлуатаційних напружень в матеріалі деталі

В процесі експлуатації деталей під дією змінних навантажень в матеріалі деталі утворюються напруження, що спричиняють її втомне руйнування.

Кінцево-елементний аналіз успішно застосовується для чисельного моделювання задач теплопровідності та напружено-деформованого стану твердих тіл [8, 112-114]. Аналіз цих та інших робіт дозволив зробити висновок про доцільність використання методу кінцевих елементів (КЕ) для аналізу напружено-деформованого стану деталей в процесі їх експлуатації.

Для чисельного моделювання напружено-деформованого стану таких деталей обрано програмний комплекс FEMAP 10.2.0 фірми Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. для операційної системи Windows NT (2000, SP3; XP, SP2; Vista; Seven), що має дві складові: універсальний пре- та постпроцесор FEMAP 10.2.0, а також аналізатор NX Nastran 7.1.

Інструменти FEMAP дозволяють проводити геометричне та кінцево-елементне моделювання конструкцій, задавати початкові та граничні умови навантаження, тобто створювати крайові задачі (препроцесор) для їх подальшого кінцево-елементного розрахунку з застосуванням NX Nastran (процесор) з подальшим переглядом та фіксацією результатів в середовищі FEMAP (постпроцесор).

Дослідження напружено-деформованого стану деталі засобами FEMAP розпочинаються з аналізу геометрії тіла, умов його навантаження, властивостей матеріалу. На основі цієї інформації створюється розрахункова

модель, що є наближеною до досліджуваного тіла із реального матеріалу та дійсними умовами експлуатації. Ця модель дозволяє виконати чисельний розрахунок тіла з метою отримання зображення величини та розподілу напружень з урахуванням початкових і граничних умов його закріплення та навантаження.

Висновки до розділу 2

1. Для випробування зразків на втому типу I відповідно до ГОСТ 25.502-79 запропоновано схему навантаження чистий згин при їх обертанні. Це дало можливість запропонувати методику втомних експериментальних досліджень зразків на випробувальній машині МУИ-6000 і в подальшому визначити кількість циклів до їх руйнування при різних амплітудних напруженнях циклу.

2. Запропонована методика формування робочої частини зразків, що включає токарне оброблення їх поверхні з припуском на заключний чистовий токарний перехід, видалення рисок на поверхні зразків від попереднього токарного оброблення та округлення гострих крайок, зняття наклепу шляхом термічного оброблення, чистове токарне оброблення зразків, що дозволяє визначити вплив режимів різання на опір втомі.

3. Для випробувань при статичному розтягу на випробувальному стенді BISS Bi-01-103 розроблено ескіз зразків, що дало можливість розробити методику випробувань при статичному розтягу для визначення їх механічних характеристик та зменшити кількість досліджень на втому.

4. Для проведення експериментальних досліджень параметрів шорсткості, мікротвердості та мікроструктури розроблено відповідні методики, що дозволяють визначити вплив режимів токарного оброблення на стан поверхневого шару зразків.

5. Запропонована в роботі методика обробки результатів експериментальних досліджень дозволяє кількісно оцінити зв'язок між

технологічними умовами оброблення та циклічною довговічністю з отриманням відповідних математичних моделей.

6. З метою врахування реальних характеристик матеріалу деталі при визначенні її циклічної довговічності розроблено відповідну методику, що дозволяє використовувати отриману математичну модель для необхідних розрахунків при дослідженні іншого конструкційного матеріалу даної класифікаційної групи.

7. Запропоновано спосіб визначення раціональних режимів фінішного токарного оброблення деталі на основі методу ковзаючого допуску, що дозволяє встановити режими токарного оброблення, які забезпечують необхідне значення циклічної довговічності деталі при максимальній продуктивності її токарного оброблення в області допустимих рішень, що задана системою обмежень.

8. Запропонована методика визначення напружень в матеріалі деталі в процесі її експлуатації під дією змінних навантажень шляхом чисельного моделювання методом кінцево-елементного аналізу в середовищі програмного комплексу FEMAP 10.2.0, що дозволяє використовувати отримані значення напружень як початкові дані при розв'язанні оптимізаційної задачі.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТОКАРНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ОПІР ВТОМІ ДЕТАЛЕЙ

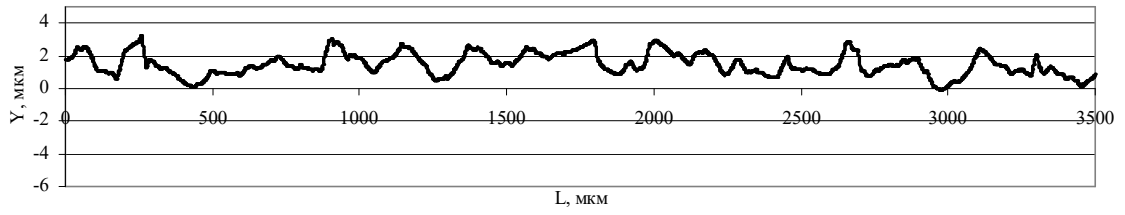
В розділі наведені результати експериментальних досліджень впливу режимів токарного оброблення на параметри шорсткості, мікротвердості, зміцнення та мікроструктури поверхневого шару зразків зі сталі 40Х.

3.1. Дослідження параметрів шорсткості

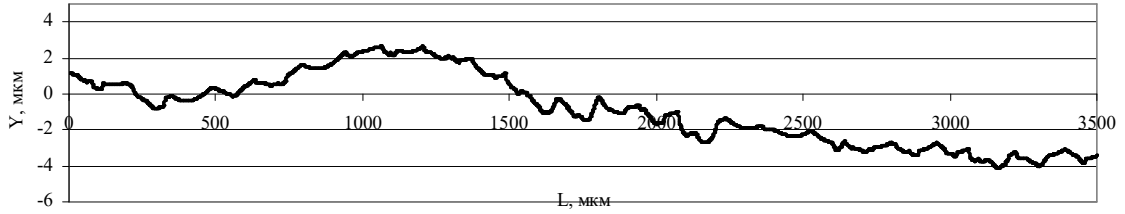
Дослідження мікрогеометрії виконувалося на спеціально підготовлених зразках зі сталі 40Х, що оброблені при різних значення подачі й швидкості різання та при глибині різання 0,3 мм (табл.2.2.). Методика проведення дослідження шорсткості поверхневого шару оброблених зразків представлена в розділі 2. Результати вимірювання параметрів шорсткості наведені в таблиці 3.1. На рис. 3.1. наведені профілограми поверхонь, що оброблені за різних режимів різання.

Таблиця 3.1. Значення параметрів шорсткості оброблених зразків

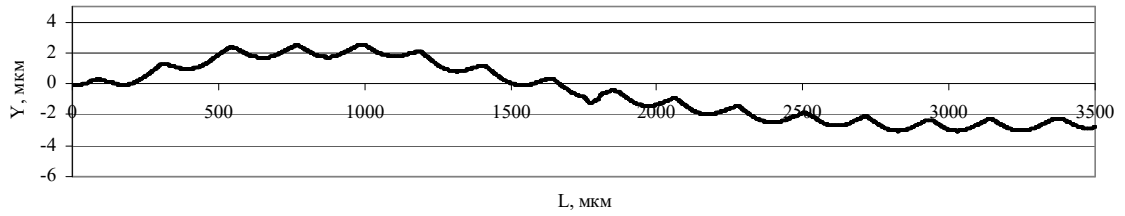
№	V , м/хв	S , мм/об	Ra , мкм	Rz , мкм	$Rmax$, мкм	Sm , мкм
1	80	0,12	2,684	12,727	16,272	112,960
2	120	0,08	1,45	7,15	10,99	84,24
3	120	0,12	1,68	7,47	11,26	110,15
4	120	0,10	1,57	7,14	9,47	98,46
5	80	0,08	2,66	13,11	16,02	103,06
6	180	0,08	1,13	5,76	13,96	80,23
7	180	0,10	1,52	6,21	10,12	110,28
8	180	0,12	1,35	6,01	9,63	93,80
9	180	0,16	1,94	8,58	11,31	145,632



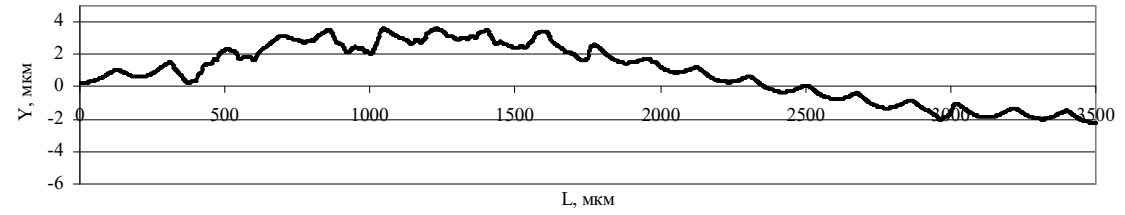
a)



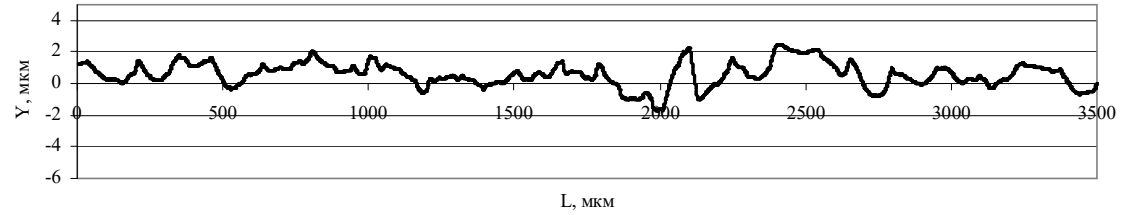
б)



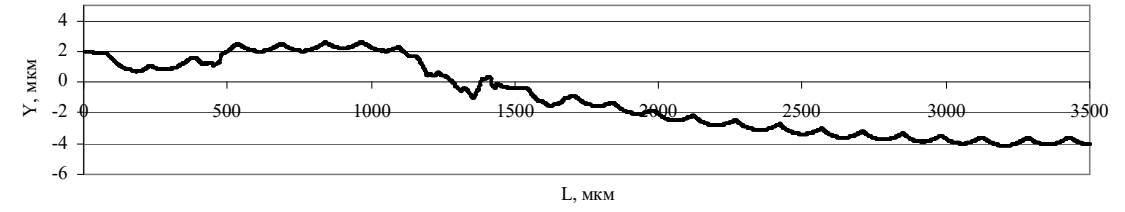
B)



Г)



Д)



e)

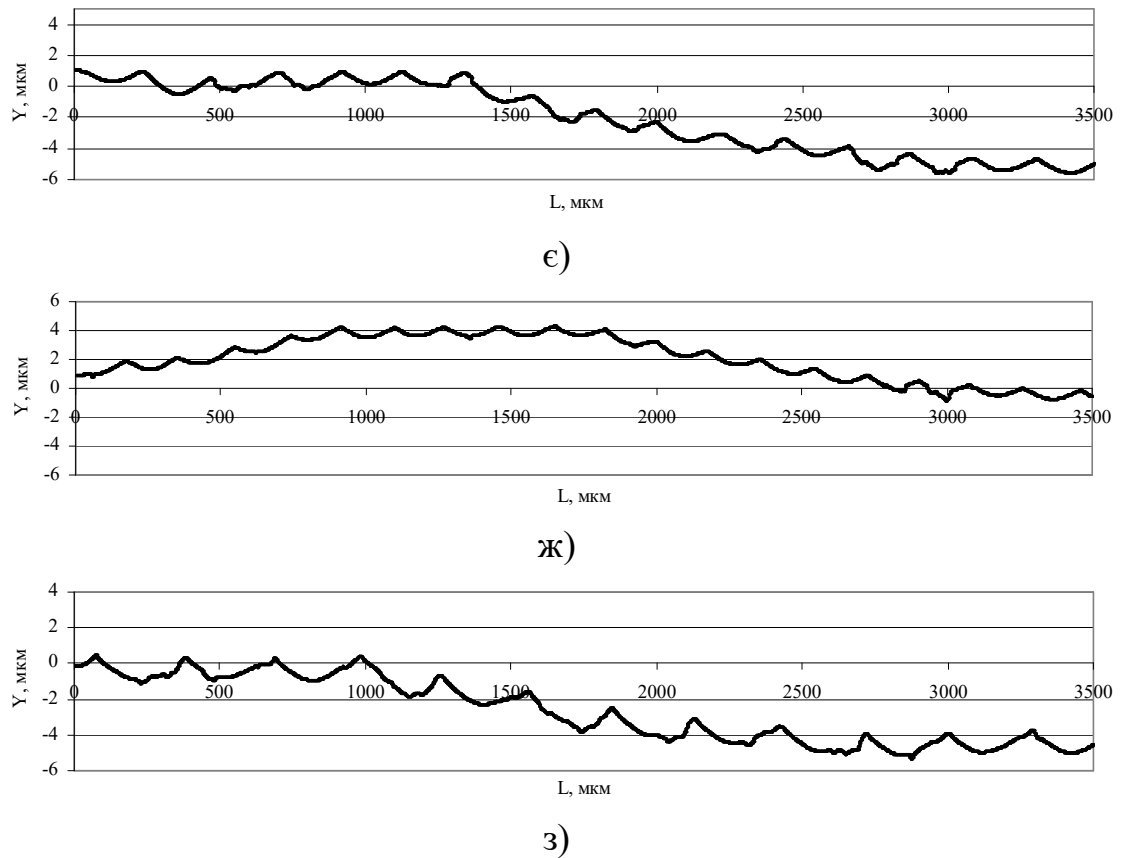


Рис. 3.1. Профілограми оброблених поверхонь при різних режимах різання:

- а) $V=80$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм; б) $V=120$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм;
 в) $V=120$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм; г) $V=120$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм;
 д) $V=80$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм; е) $V=180$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм;
 є) $V=180$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм; ж) $V=180$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм;
 з) $V=180$ м/хв., $S=0,16$ мм/об, $h=0,3$ мм

Аналіз отриманих результатів показав, що найменші значення параметрів Ra , Rz та Sm відповідають режиму оброблення з $V=180$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм та $Rmax - V=120$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм.

Найбільші значення параметрів Ra , $Rmax$ отримано за режиму оброблення $V=80$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм, а $Rz - V=80$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм та $Sm - V=180$ м/хв., $S=0,16$ мм/об, $h=0,3$ мм.

Аналіз результатів наведених досліджень параметрів шорсткості підтверджують висновки про те, що найбільш інформативними і чутливими до зміни режимів різання є Sm та $Rmax$ і їх доцільно в подальшому

використовувати при прогнозуванні втомних характеристик токарно оброблених деталей.

3.2. Дослідження металографічних властивостей поверхневого шару оброблених зразків

Визначення металографічних властивостей поверхневого шару зразків здійснювали на мікросліфах, що представлені на рис. 2.10, згідно з методики, що наведено в розділі 2.

Результати вимірювання мікротвердості поверхневого шару зразків, що отримані при їх обробленні з різними режимами, наведено на рис. 3.2.

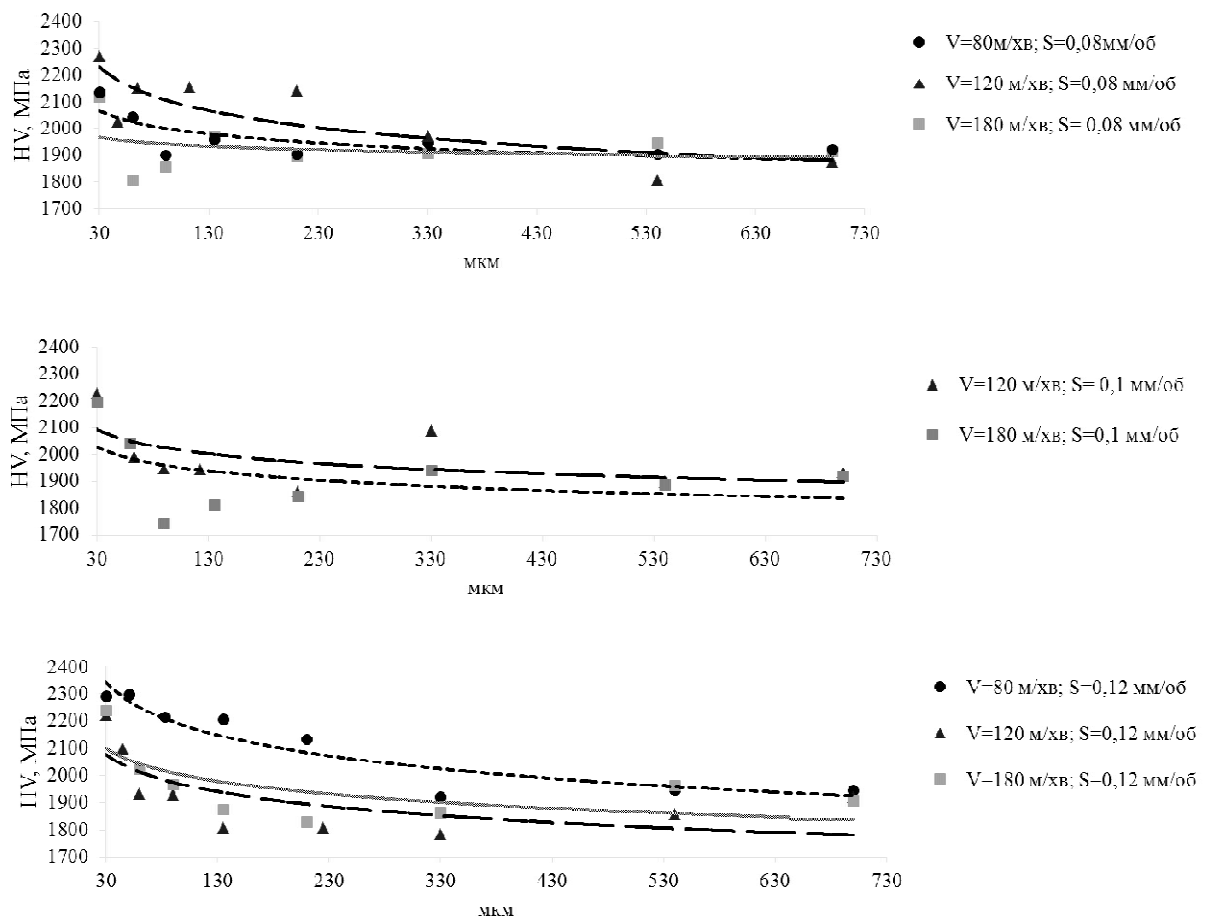


Рис. 3.2. Результати визначення мікротвердості поверхневого шару зразків по Вікерсу за різних режимів оброблення

На цих рисунках вісь абсцис відповідає глибині поверхневого шару, а вісь ординат – виміряній мікротвердості по Віккерсу. Найбільші значення мікротвердості на наведених рисунках спостерігаються на глибині 30-130 мкм. Надалі поступово з глибини 400 до 700 мкм значення мікротвердості для всіх зразків вирівнюються, що відповідає мікротвердості основного матеріалу та становить 1900 МПа.

Ступінь зміцнення пластично деформованих поверхневих шарів u_H після токарного оброблення за різних режимів різання визначали відповідно до формули (2.3). Результати цих розрахунків представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Значення ступеню зміцнення пластично деформованих шарів в зразках, що оброблені за різних режимів різання

Варіант режиму оброблення	V , м/хв	S , мм/об	$H_{нов}$, МПа	$H_{осн}$, МПа	u_H , %
1	80	0,12	2291,70	1946,32	17,75
2	120	0,08	2271,61	1875,00	21,15
3	120	0,12	2223,08	1921,58	15,69
4	120	0,1	2229,26	1935,06	15,20
5	80	0,08	2135,49	1921,58	11,13
6	180	0,08	2119,49	1912,00	10,85
7	180	0,1	2197,42	1921,58	14,35
8	180	0,12	2240,91	1905,49	17,60

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільші значення ступеня зміцнення пластично деформованих поверхневих шарів відповідають 1-му та 2-му варіантам режимів токарного оброблення, а найменші – 5-му і 6-му.

Дослідження впливу режимів токарного оброблення на мікроструктуру приповерхневих шарів мікрошліфів виконували згідно методики, що наведена в розділі 2. Результати дослідження представлені у вигляді електронних фрактографій поверхневих шарів мікрошліфів після токарного оброблення за різних режимів на рис.3.3.

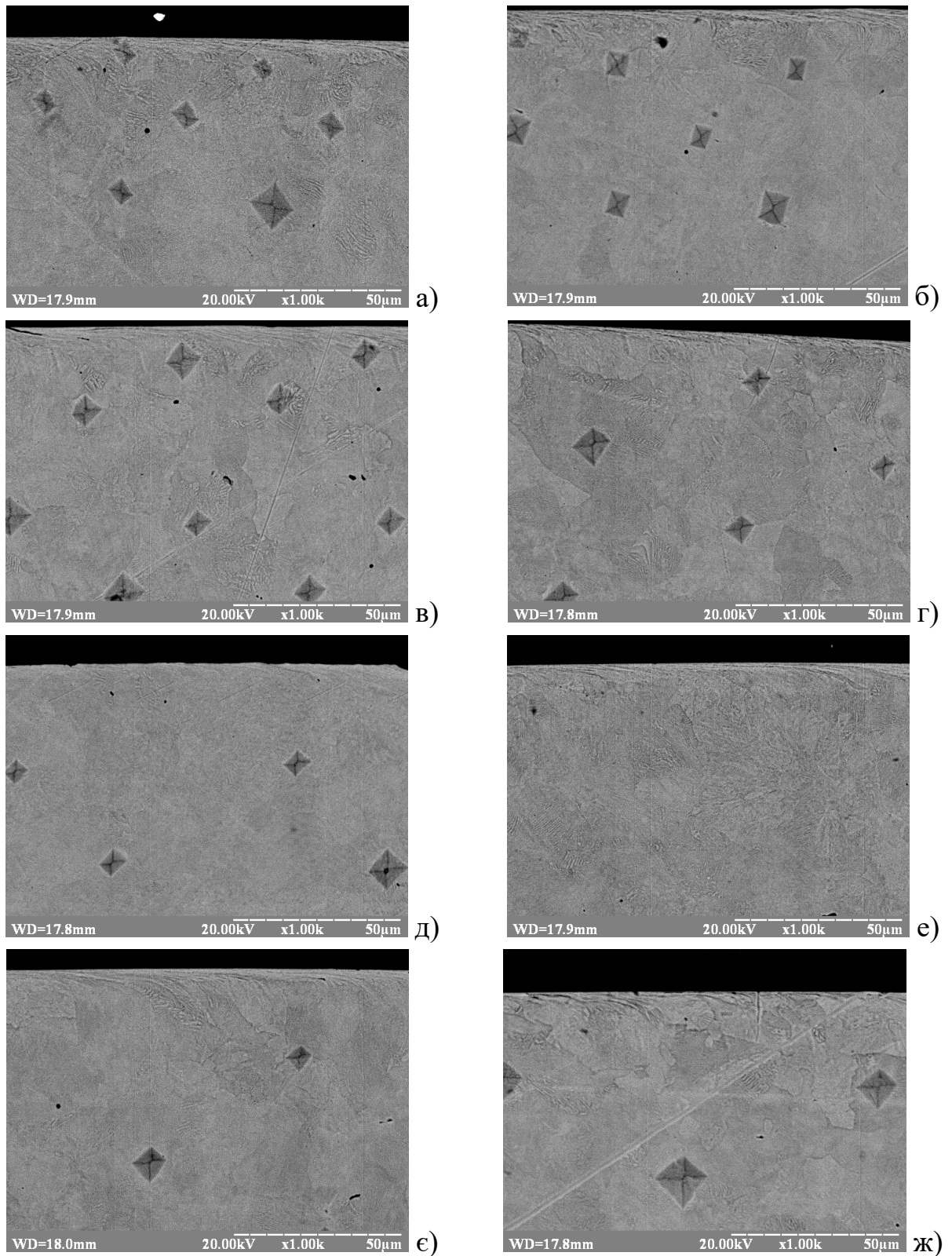


Рис. 3.3. Електронні фрактографії поверхневого шару мікросліфів:

- а) $V=80$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм; б) $V=120$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм;
 в) $V=120$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм; г) $V=120$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм;
 д) $V=80$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм; е) $V=180$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм;
 є) $V=180$ м/хв., $S=0,1$ мм/об, $h=0,3$ мм; ж) $V=180$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм

Результати мікроструктурного аналізу угоджуються з отриманими попередньо значеннями ступенів зміцнення, адже перліт є твердою, ферит – м'якою фазою структури металу. Аналіз отриманих електронних фрактографій мікрошліфів показує, що для зразків рис. 7(а, б, ж) в приповерхневих шарах переважає фаза перліту в порівнянні з фазою фериту. Для зразків рис. 7(в, г, є) фаза перліту менше виражена, а для зразків рис. 7(д, е) майже не проглядається.

Результати досліджень параметрів якості поверхневого шару зразків за показниками шорсткості, мікротвердості та мікроструктури дозволили встановити, що кожний із цих показників є чутливим до режиму токарного оброблення, які в подальшому впливають на циклічну довговічність деталей в умовах експлуатації при змінних навантаженнях.

3.3. Дослідження механічних характеристик матеріалу при статичному розтягу

Відповідно до методики проведення експериментальних дослідження, що представлена в розділі 2, виготовлено зразки для випробувань при статичному розтягу. Зовнішній вигляд досліджуваних зразків показано на рис 3.4.



Рис. 3.4. Зовнішній вигляд зразків для випробувань на розтяг

При проведенні досліджень зразок встановлювали в гідравлічні самоцентруючі захвати випробувального стенду BISS Bi-01-103.

Вимірювання поєздовжньої деформації з робочої частини зразку виконували за допомогою екстензометру (рис. 3.5).

Зразки розтягували при постійній швидкості руху захватів з визначенням залежності подовження зразку Δl під дією зусилля P . Дослідження на розтяг виконували до утворення шийки розтягу, як це показано на рис. 3.6.

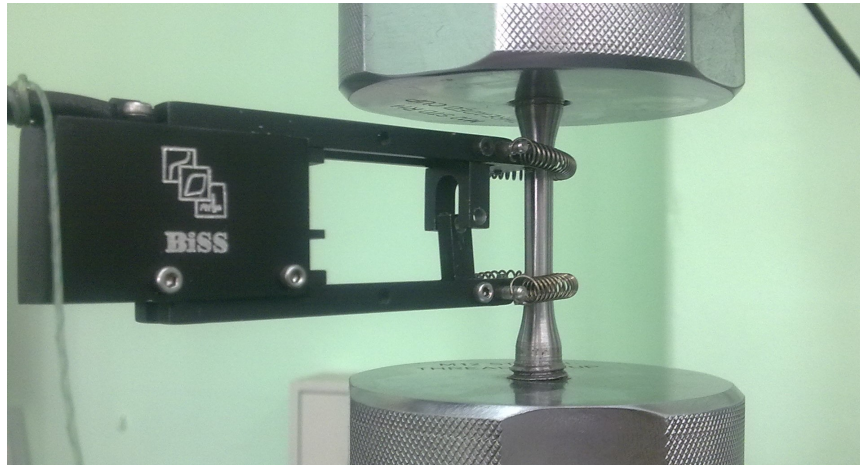


Рис. 3.5. Загальний вигляд зразка в захватах випробувального стенду та встановленим екстензометром



Рис. 3.6. Загальний вигляд зразка з утвореною шийкою розтягу

За результатами експериментальних досліджень побудовано діаграму розтягу, що показана на рис. 3.7.

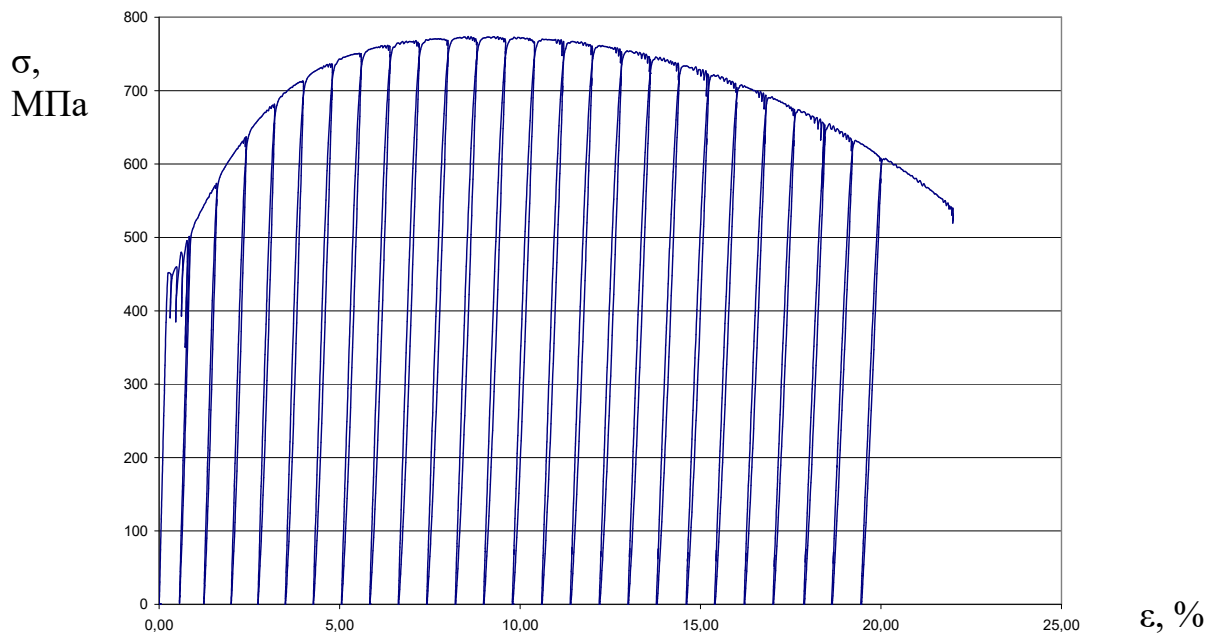


Рис. 3.7. Діаграма розтягу для зразків зі сталі 40Х ГОСТ 4543-71

Визначено значення границі міцності σ_v , границі пропорційності $\sigma_{пц}$, границі текучості $\sigma_{тек}$, модуля пружності E , відносного звуження ψ та відносного видовження δ досліджуваного матеріалу. Значення вказаних параметрів для трьох зразків наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Результати обробки експериментальних досліджень при статичному розтягу

№ п/п зразка	σ_v , МПа	$\sigma_{пц}$, МПа	$\sigma_{тек}$, МПа	E , МПа	Відносне звуження ψ , %	Відносне видовження δ , %
1	785	417	364	214952	66,51	18,09
2	783	441	395	212175	67,51	17,90
3	773	384	384	203973	68,83	18,01

Результати проведених досліджень дозволили встановити параметри механічних властивостей матеріалу для визначення умов проведення його досліджень на втому.

3.4. Дослідження зразків на втому

Відповідно до методики проведення експериментальних дослідження, що представлена в розділі 2, виготовлено зразки зі сталі 40Х, для випробувань на втому (рис 3.8). Режими токарного оброблення зразків представлено в таблиці 2.1.



Рис. 3.8. Загальний вигляд зразку для випробувань на втому

З метою встановлення залежності циклічної довговічності матеріалу деталі від режимів різання при токарному обробленні, відповідно до розробленої в розділі 2 методики експериментальних досліджень, виконано випробування зразків на втому при кімнатній температурі [115].

Випробування виконували до утворення макротріщини або повного руйнування зразку (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Загальний вигляд зразку після руйнування

Фотографії вигляду втомних зломів зразку (рис. 3.9) показано на рис. 3.10. На цих знімках можна виділити чотири основні зони, що є характерними для втомного руйнування:

- 1 – зона осередку зародження втомного пошкодження;
- 2 – зона поступового просування тріщин;
- 3 – зона прискореного розвитку тріщин;
- 4 – зона долому.

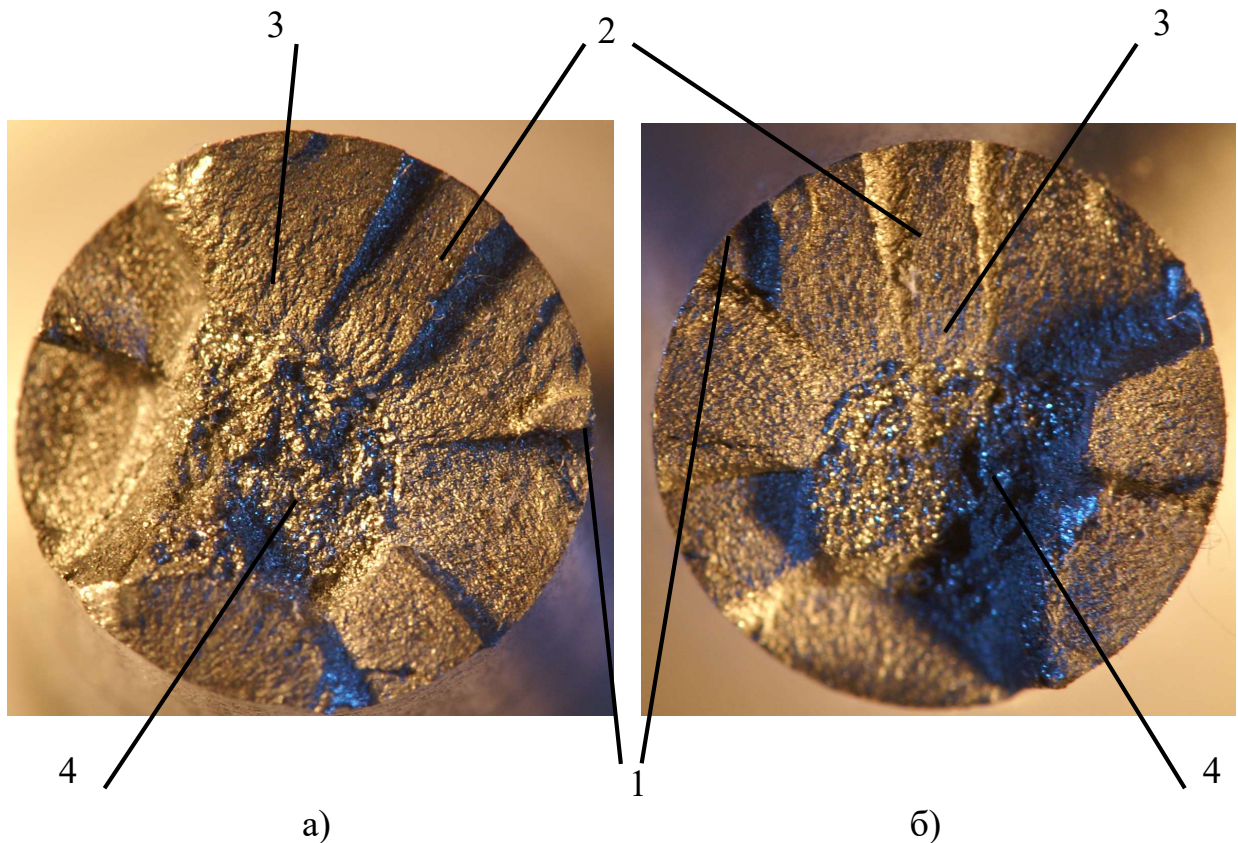


Рис. 3.10. Фотографії загального вигляду втомного злому зразку, де а) права частина зразку, б) ліва частина зразку

Вивчення мікроструктури втомних зломів зразків виконували в Центрі електронної мікроскопії інженерно-фізичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на скануючому електронному мікроскопі РЕМ 106И. Виконані дослідження дозволили визначити місце зародження втомної тріщини в досліджуваному зразку (рис. 3.11).

За результатами досліджень побудовано криві багатоциклової втоми зразків зі сталі 40Х при симетричному режимі навантаження з використанням одинарних логарифмічних координат.

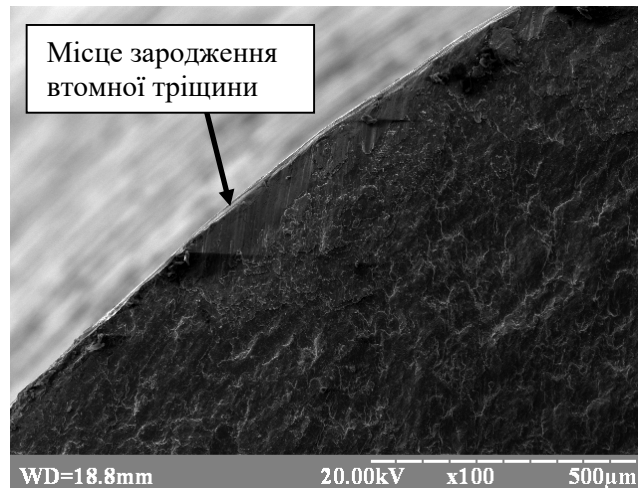


Рис. 3.11. Електронна фрактографія втомного зламу зразку зі сталі 40Х при $\sigma = 300$ МПа

Вказані криві для зразків з режимами оброблення $V = 120$ м/хв; $S = 0,12$ мм/об; $h = 0,3$ мм представлено на рис.3.12, для зразків з режимами оброблення $V = 80$ м/хв; $S = 0,08$ мм/об; $h = 0,3$ мм – на рис. 3.13, для зразків з режимами оброблення $V = 180$ м/хв; $S = 0,08$ мм/об; $h = 0,3$ мм – на рис. 3.14.

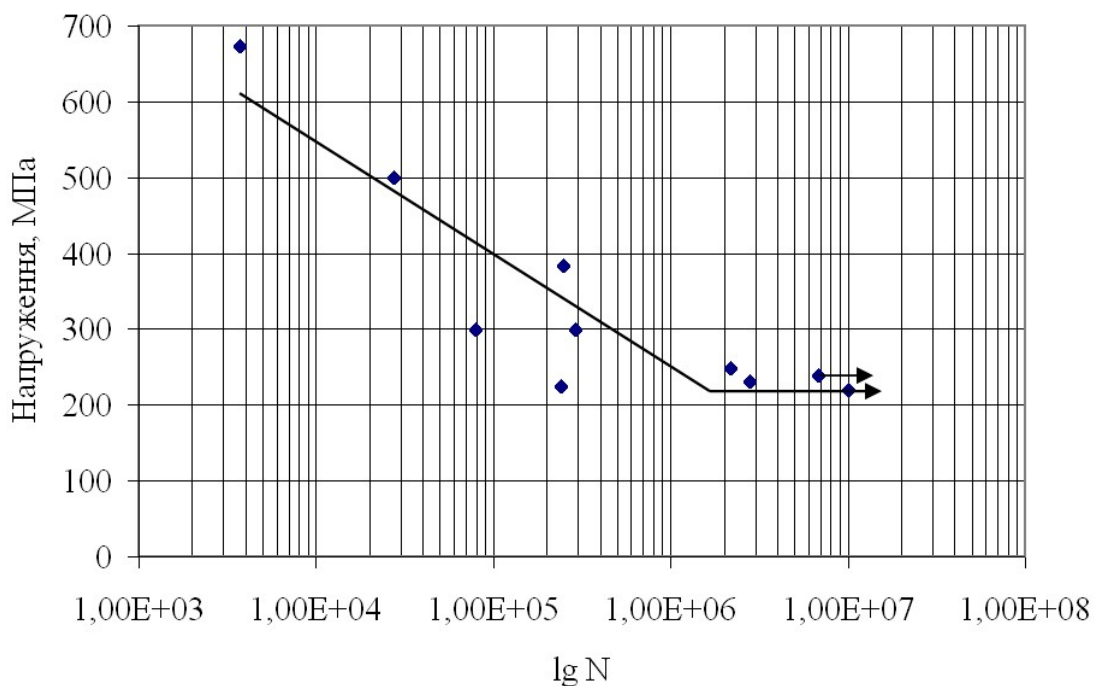


Рис. 3.12. Результати випробувань на втому зразків зі сталі 40Х ($V = 120$ м/хв; $S = 0,12$ мм/об; $h = 0,3$ мм)

На рис. 3.15 представлено криві втоми для зразків зі сталі 40 Х, що отримані на різних режимах токарного оброблення. Їх аналіз дозволяє

зробити висновок про вплив режимів оброблення на довговічність зразків. Так, найменшу довговічність мають зразки, що оброблені за режиму $V=80$ м/хв; $S=0,08$ мм/об; $h=0,3$ мм, а найбільшу – за режиму $V=120$ м/хв; $S=0,12$ мм/об; $h=0,3$ мм. При цьому розбіжність між отриманими експериментальними значеннями кількості циклів до руйнування збільшується при зменшенні напруження циклу.

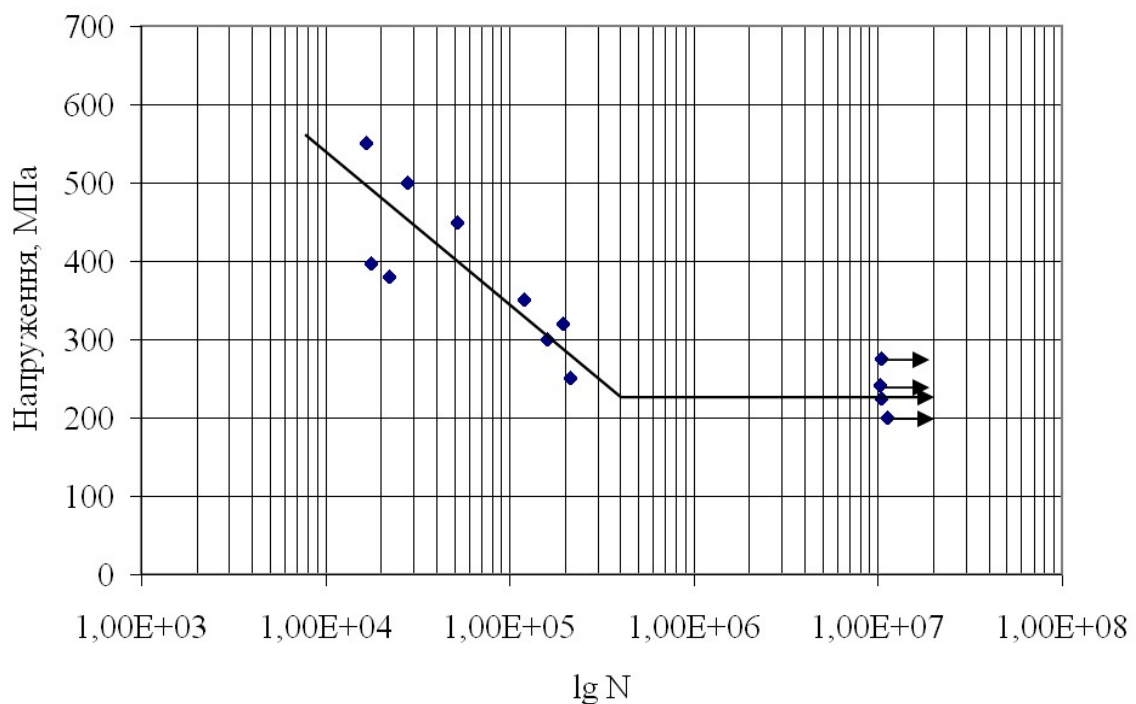


Рис. 3.13. Результати випробувань на втому зразків зі сталі 40X
($V=80$ м/хв; $S=0,08$ мм/об; $h=0,3$ мм)

Так, при напруженні 500 МПа кількість циклів до руйнування для зразків, що оброблені за режиму $V=80$ м/хв, $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм склала 11300 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V=180$ м/хв, $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм – 15000 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V=120$ м/хв; $S=0,12$ мм/об; $h=0,3$ мм – 20500 циклів.

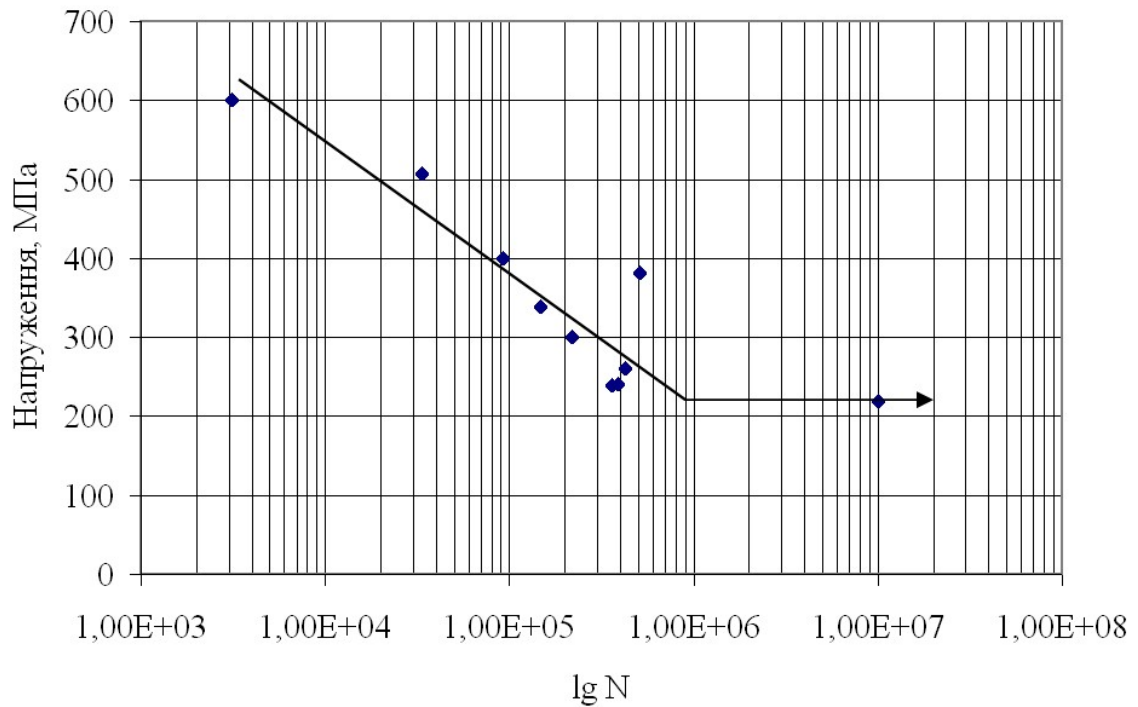


Рис. 3.14. Результати випробувань на втому зразків зі сталі 40X
($V = 180$ м/хв; $S = 0,08$ мм/об; $h = 0,3$ мм)

При напруженні 400 МПа кількість циклів до руйнування для зразків, що оброблені за режиму $V=80$ м/хв, $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм склала 40600 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V=180$ м/хв, $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм – 59700 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V=120$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм – 95000 циклів.

При напруженні 300 МПа кількість циклів до руйнування для зразків, що оброблені за режиму $V=80$ м/хв, $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм склала 150000 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V=180$ м/хв., $S=0,08$ мм/об, $h=0,3$ мм – 290000 циклів; для зразків, що оброблені за режиму $V=120$ м/хв., $S=0,12$ мм/об, $h=0,3$ мм – 430000 циклів.

Таким чином, максимальна розбіжність кількості циклів до руйнування при напруженні 300 МПа для зразків, що оброблені за режиму $V=80$ м/хв; $S=0,08$ мм/об; $h=0,3$ мм та зразків, що оброблені за режиму $V=120$ м/хв; $S=0,12$ мм/об; $h=0,3$ мм становила 2,9 рази.

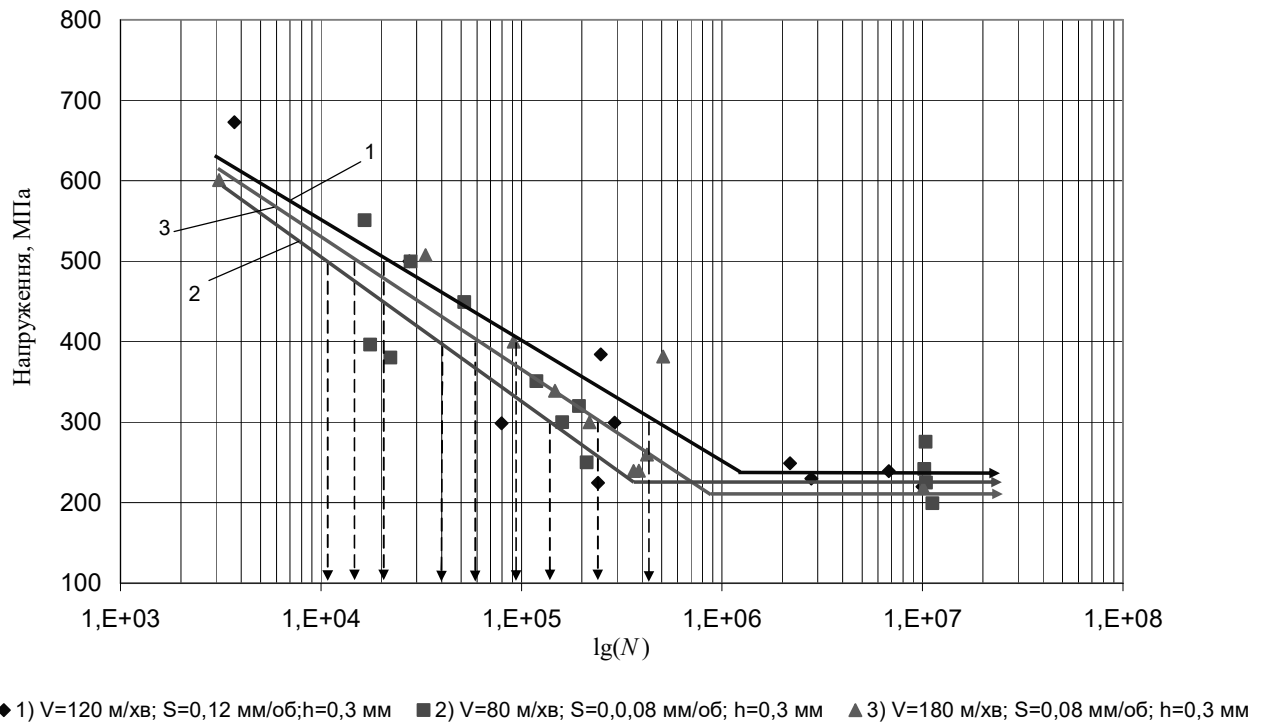


Рис. 3.15. Порівняльний вигляд кривих втомних зразків, що оброблені за різних режимів різання

Отже, можна зробити висновок про суттєвий вплив режимів токарного оброблення на довговічність деталей та можливість її прогнозування і визначення методики технологічного забезпечення.

Висновки до розділу 3

За результатами проведених експериментальних досліджень впливу технологічних параметрів механічного оброблення на втомні характеристики матеріалу зразків зі сталі 40 X можна зробити наступні висновки:

1. Аналіз результатів наведених досліджень параметрів шорсткості підтверджують висновки про те, що найбільш інформативними і чутливими до зміни режимів різання є S_m та R_{max} і їх доцільно в подальшому використовувати при прогнозуванні втомних характеристик механічно оброблених деталей.

2. Дослідження мікротвердості поверхневого шару матеріалу зразків після токарного оброблення показали, найбільші значення мікротвердості спостерігаються на глибині 30-130 мкм, а надалі поступово з глибини 400 до 700 мкм значення мікротвердості стабілізується для всіх зразків, яка відповідає мікротвердості основного матеріалу. На основі цього можна зробити висновок, що умови механічного оброблення мають найбільший вплив на приповерхневий шар, що підлягає подальшому дослідженню.

3. Експериментальні дослідження ступеня зміцнення пластично деформованих поверхневих шарів зразків, що оброблені за різних режимів різання, дозволяють встановити діапазон значень швидкості і подач при визначенні умов виготовлення зразків для втомних випробувань матеріалу деталі.

4. Проведені дослідження мікроструктури в приповерхневих шарах зразків та отримані електронні фрактографії мікрошліфів дозволили встановити, що режими оброблення суттєво впливають на формування фазового складу досліджуваних зразків. Це дозволяє отримати якісну оцінку мікроструктури поверхневого шару, яка узгоджується з результатами дослідження мікротвердості поверхневого шару матеріалу зразків.

5. Дослідження параметрів якості поверхневого шару за показниками шосткості, мікротвердості та мікроструктури дозволили встановити, що кожний із цих показників є чутливим до режиму оброблення, які впливають на циклічну довговічність деталей в умовах експлуатації при змінних навантаженнях.

6. Експериментальні дослідження зразків зі сталі 40Х при статичному розтягу дозволили встановити параметри механічних властивостей досліджуваного матеріалу для визначення умов проведення випробувань на втому, при цьому границя міцності $\sigma_g = 780$ МПа, границя пропорційності $\sigma_{пц} = 414$ МПа, границя текучості $\sigma_{тек} = 381$ МПа, модуль

пружності $E=210400$ МПа, відносьнезвуження $\psi=67,6\%$ та відносьне видовження $\delta=18\%$.

7. За результатами експериментальних досліджень зразків зі сталі 40Х на втому встановлено вплив режимів токарного оброблення на довговічність зразків. При цьому максимальна розбіжність кількості циклів до руйнування спостерігається для зразків, що оброблені за режиму токарного оброблення $V=80$ м/хв; $S=0,08$ мм/об; $h=0,3$ мм, та зразків, що оброблені за режиму $V=120$ м/хв; $S=0,12$ мм/об; $h=0,3$ мм, при напруженні циклу 300 МПа, вона складає на рівні 2,9 рази.

8. Результати проведених досліджень зразків зі сталі 40Х на втому дозволили встановити вплив режимів різання на циклічну довговічність матеріалу зразків за різних напружень циклу та розв'язати задачу створення методики технологічного забезпечення надійної експлуатації деталей, що працюють в умовах змінних навантажень.

РОЗДІЛ 4.

ВИЗНАЧЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ МАТЕРІАЛУ ДЕТАЛІ ПІСЛЯ ЇЇ ТОКАРНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Ефективність процесу механічного оброблення в загальному випадку оцінюють рядом показників, які відображають ступінь відповідності виробу своєму службовому призначенню (службові показники); визначають темпи випуску (показники продуктивності); характеризують процес споживання виробничих сил – знос обладнання, оснащення, інструмента тощо (функціональні); показують затрати праці в конкретному технологічному процесі (економічні) [116]. Всі показники можуть бути виражені кількісно. В зв'язку з цим, при розробці будь якого технологічного процесу бажано їх підтримувати на екстремальному рівні шляхом поступового покращення. Оскільки в загальному випадку для технологічного процесу не вдається досягти екстремальності всіх показників, тому головна задача оптимізації процесу металооброблення полягає у виборі критерію оптимальності і обмежень на вказані показники технологічного процесу.

Тому в даному розділі розглядаються питання визначення раціональних режимів токарного оброблення матеріалу деталі, що забезпечують її необхідну циклічну довговічність та найбільшу продуктивність виготовлення.

Розв'язання оптимізаційної задачі вимагає створення математичної моделі, де критеріями будуть циклічна довговічність матеріалу деталі та продуктивність процесу оброблення.

4.1. Комплексний показник стану поверхневого шару деталі від режимів токарного оброблення

З метою визначення комплексного впливу стану поверхневого шару зразків на їх втомну міцність після токарного оброблення шляхом обробки

результатів досліджень шорсткості та мікротвердості отримано наступні математичні моделі:

$$R_{\max}(S, V) = 15,1 - 0,114 \cdot V + 189,3 \cdot S - 1,605 \cdot VS - 5,769 \cdot VS^2 + 0,011 \cdot V^2 S; \quad (4.1)$$

$$Sm(S, V) = 94,834 - 0,111 \cdot V + 472,878 \cdot S - 6,907 \cdot VS + 21,887 \cdot VS^2 + 0,018 \cdot V^2 S; \quad (4.2)$$

$$u_H(S, V) = 14,942 + 0,119 \cdot V + 126,8 \cdot S - 0,683 \cdot VS + 17,204 \cdot VS^2 - 0,09 \cdot V^2 S. \quad (4.3)$$

Залежності (4.1-4.3) дійсні в такому діапазоні режимів різання: $V=80 - 180$ м/хв.; $S=0,08 - 0,12$ мм/об. Ці моделі є адекватними за F-критерієм Фішера при довірчій ймовірності 0,95.

Таким чином, згідно з методикою використання кількох часткових критеріїв в математичній моделі, що надана в [86], комплексний показник стану поверхневого шару деталі, який залежить від режимів різання у вказаному раніше діапазоні швидкостей і подач, для трьох його часткових складових з урахуванням їх вагових коефіцієнтів можна представити в такому вигляді:

$$P(S, V) = \alpha_1 \left(\frac{(15,1 - 0,114 \cdot V + 189,3 \cdot S - 1,605 \cdot VS - 5,769 \cdot VS^2 + 0,011 \cdot V^2 S) - R_{\max}(S, V)_{\min}}{R_{\max}(S, V)_{\max} - R_{\max}(S, V)_{\min}} \right) + \\ + \alpha_2 \left(\frac{(94,834 - 0,111 \cdot V + 472,878 \cdot S - 6,907 \cdot VS + 21,887 \cdot VS^2 + 0,018 \cdot V^2 S) - Sm(S, V)_{\min}}{Sm(S, V)_{\max} - Sm(S, V)_{\min}} \right) + \\ + \alpha_3 \left(\frac{(14,942 + 0,119 \cdot V + 126,8 \cdot S - 0,683 \cdot VS + 17,204 \cdot VS^2 - 0,09 \cdot V^2 S) - u_H(S, V)_{\min}}{u_H(S, V)_{\max} - u_H(S, V)_{\min}} \right), \quad (4.4)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – вагові коефіцієнти часткових критеріїв.

В результаті аналізу літературних даних [9, 35, 38] та за результатами експериментальних досліджень, які представлені в розділі 3, встановлено, що значення вагових коефіцієнтів часткових критеріїв комплексного показника стану поверхневого шару деталі дорівнюють відповідно: $\alpha_1=-1,6$; $\alpha_2=1,4$; $\alpha_3=1,1$.

В отриманій моделі (4.4), відповідно до [9, 10, 117], складова $R_{\max}(S, V)$ врахована зі знаком «-», оскільки збільшення величини R_{\max} знижує опір втомі, а складові моделі $Sm(S, V)$ та $u_H(S, V)$ зі знаком «+», тому що їх зростання підвищує опір втомі.

Графік залежності комплексного показника стану поверхневого шару деталі від режимів різання представлено на рис.4.1. З цього рисунка видно, що на досліджуваному інтервалі швидкостей і подач при збільшенні подачі і швидкості різання комплексний показник якості поверхневого шару $P(S, V)$ зростає. Це дозволяє зробити припущення про відповідне зростання циклічної довговічності.

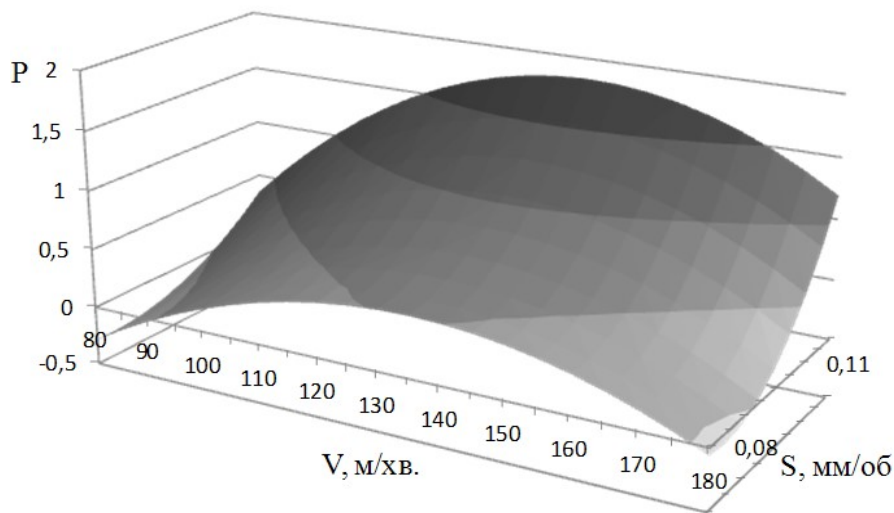


Рис. 4.1. Залежність комплексного показника якості поверхневого шару деталі від подачі та швидкості різання

4.2. Залежність циклічної довговічності від режимів механічного оброблення

На основі методики проведення експериментальних досліджень та обробки їх результатів, що представлені в розділі 2, розроблено математичну модель циклічної довговічності матеріалу сталь 40Х від режимів токарного оброблення та амплітудного напруження циклу:

$$N(S, V, \sigma) = e^k, \quad (4.5)$$

де
$$k = 14.437 + 0.0048V + 13.006S - 13.19\sigma + 0.002VS - 0.002V\sigma - 5.941S\sigma + 0.0000004V^2 + 2.929S^2 + 3.013\sigma^2.$$

Залежність (4.5), відповідно до виконаних експериментальних досліджень, дійсна в таких межах зміни параметрів: $V=80\text{--}180$ м/хв., $S=0,08\text{--}0,12$ мм/об, $\sigma = 0,225\text{--}0,670$ ГПа. Наведена модель є адекватною за F-критерієм Фішера при довірчій ймовірності 0,95.

Експериментальні значення циклічної довговічності зразків в залежності від напруження циклу для різних режимів токарного оброблення зразків з конструкційної сталі 40Х та відповідні їм розрахункові значення, що отримані за формулою (4.2) представлено на рис. 4.2–4.4.

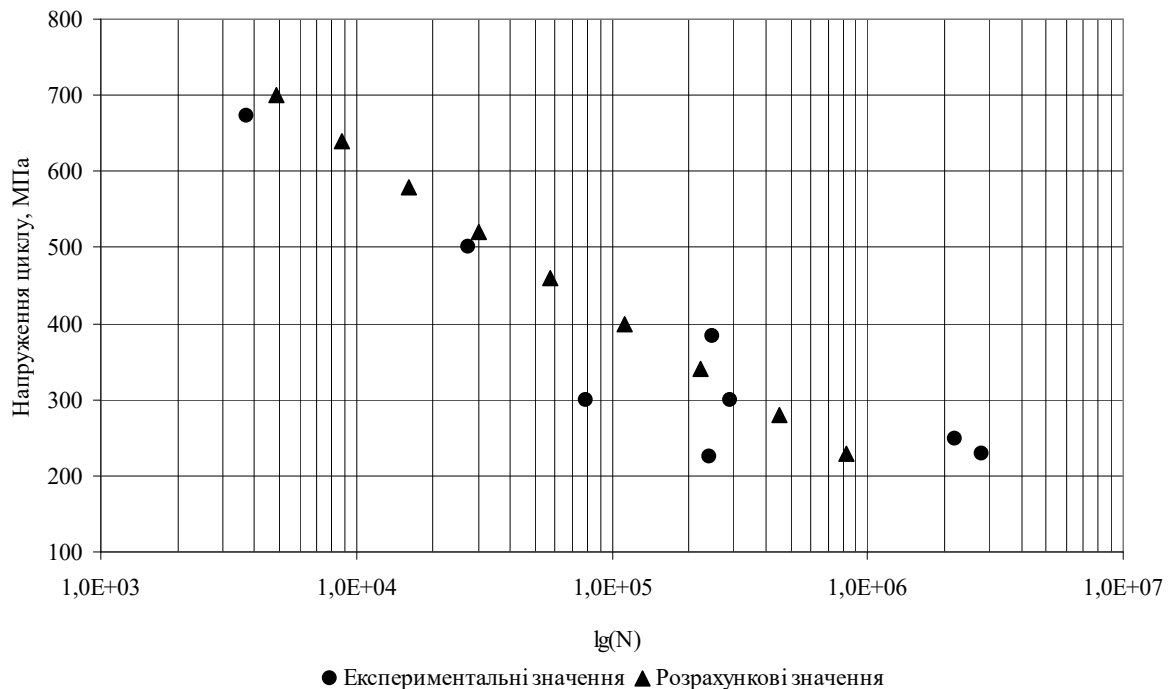


Рис.4.2. Розрахункові та експериментальні значення циклічної довговічності зразків із сталі 40Х при $V=120$ м/хв; $S=0,12$ мм/об; $h=0,3$ мм

Графіки розрахункових залежностей циклічної довговічності зразків із конструкційної сталі 40Х від напруження циклу та режимів оброблення наведено на рис. 4.5.

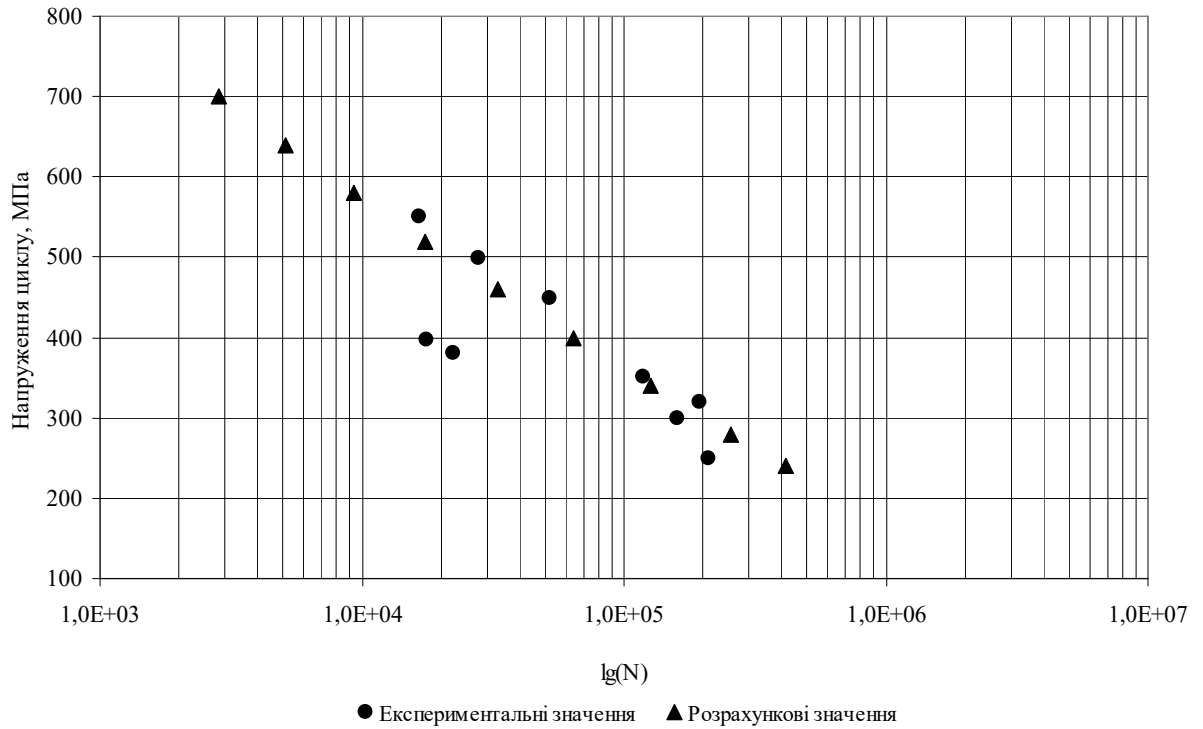


Рис.4.3. Розрахункові та експериментальні значення циклічної довговічності зразків із сталі 40Х при $V=80$ м/хв; $S=0,08$ мм/об; $h=0,3$ мм

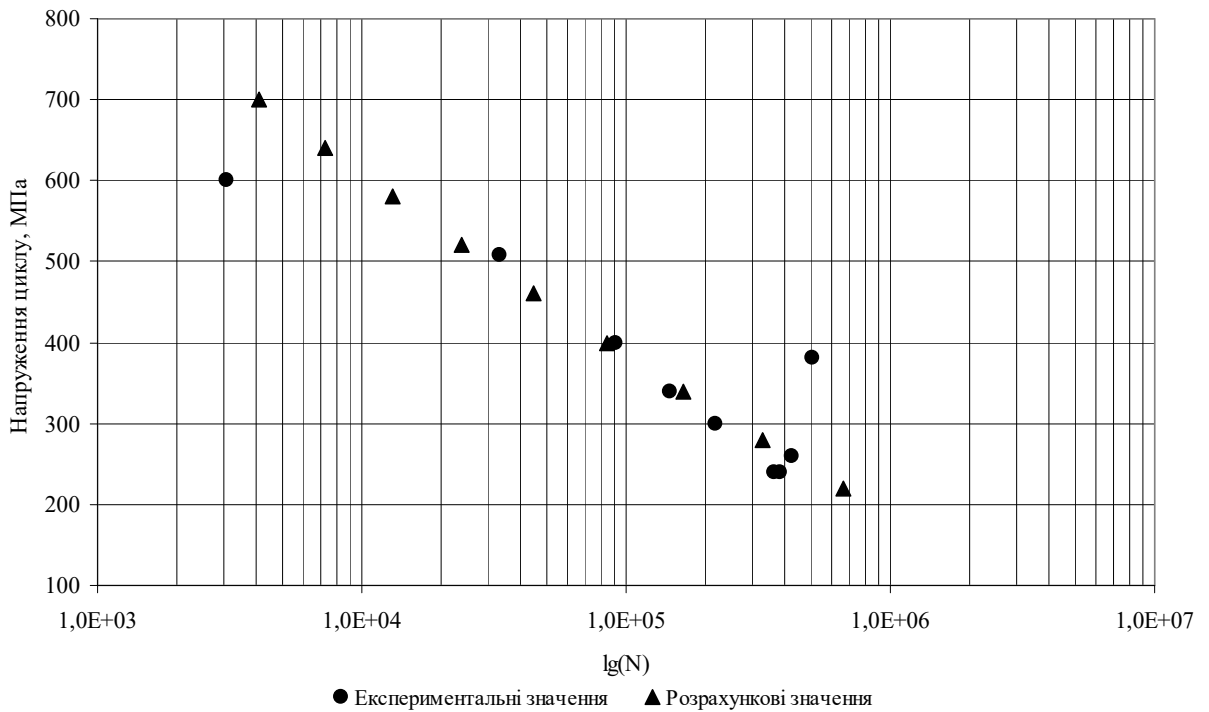


Рис.4.4. Розрахункові та експериментальні значення циклічної довговічності зразків із сталі 40Х при $V=180$ м/хв; $S=0,08$ мм/об; $h=0,3$ мм

Аналіз впливу режимів оброблення на циклічну довговічність показав, що збільшення подачі з 0,08 мм/об до 0,12 мм/об суттєво підвищує циклічну довговічність в порівнянні зі зміною швидкості різання з 80 м/хв. до 180 м/хв. Максимальне значення циклічної довговічності відповідає токарному обробленню зразків зі швидкістю різання 120 м/хв та подачею 0,12 мм/об.

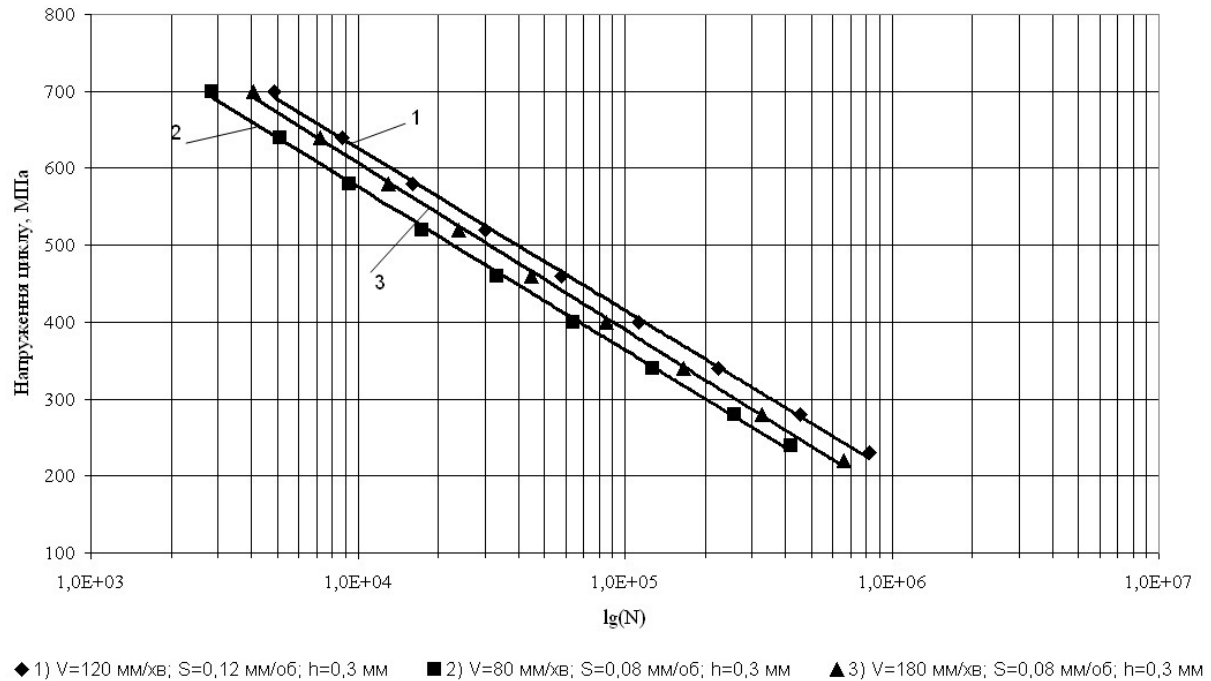


Рис.4.5. Графіки залежності циклічної довговічності від напруження циклу та режимів токарного оброблення зразків із сталі 40X

Комплексний вплив режимів токарного оброблення та напруження циклу на циклічну довговічність зразків зі сталі 40X представлено на рис. 4.6-4.8.

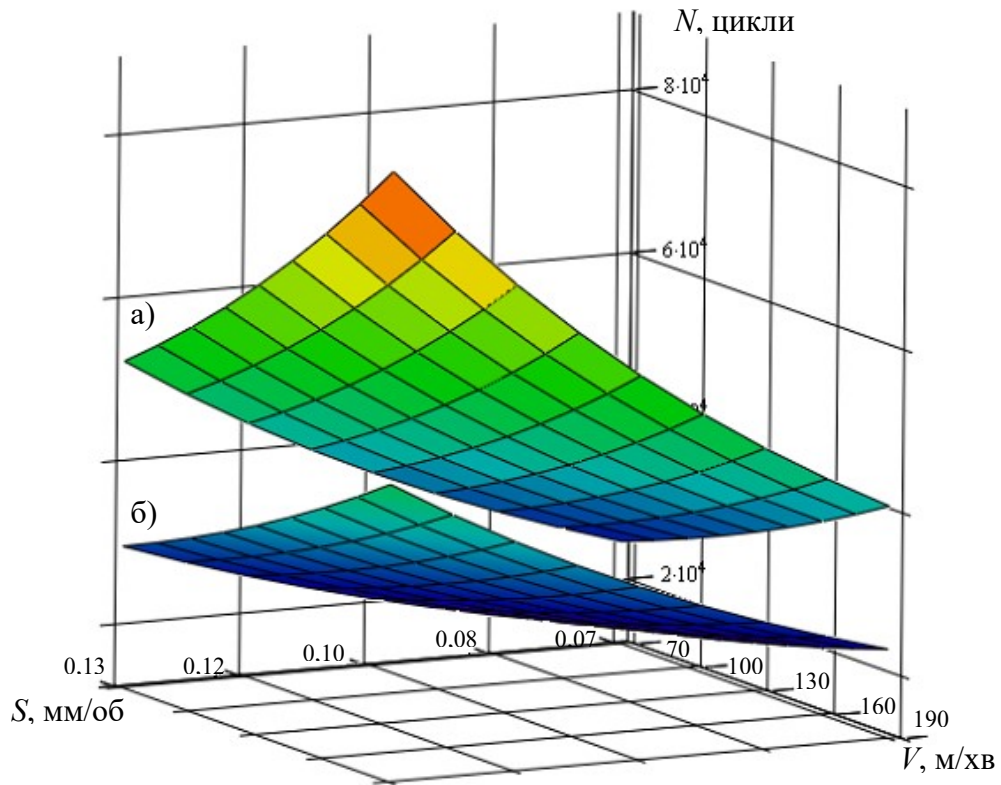


Рис. 4.6. Графіки залежності циклічної довговічності від режимів оброблення та напруження циклу при: а) $\sigma = 450$ МПа; б) $\sigma = 500$ МПа

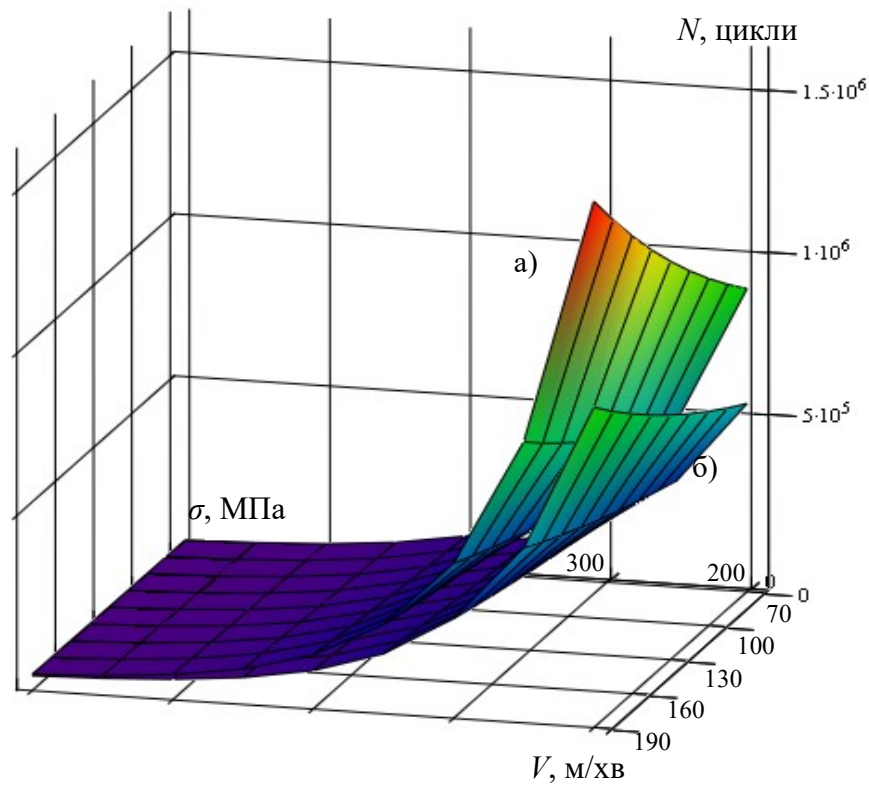


Рис.4.7. Графіки залежності циклічної довговічності від напруження циклу та режимів оброблення при: а) $S = 0,12$ мм/об; б) $S = 0,08$ мм/об

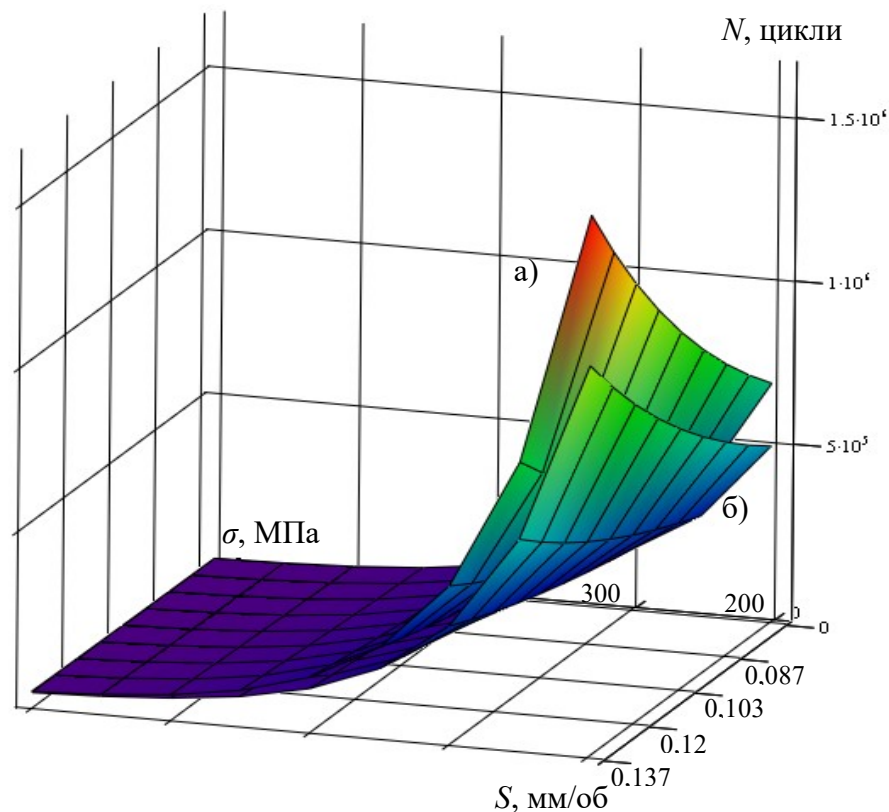


Рис.4.8. Графіки залежності циклічної довговічності від напруження циклу та режимів оброблення при: а) $V = 150$ м/хв.; б) $V = 80$ м/хв.

Аналіз результатів досліджень зразків на втому показав, що циклічна довговічність при токарному обробленні зразків зі сталі 40Х для значення подач від 0,08 до 0,12 мм/об, швидкостей різання від 80 до 180 м/хв та глибини різання 0,3 мм збільшується при збільшенні як подачі, так і швидкості різання. При цьому вплив подачі має більш вагоме значення. Це відповідає отриманій математичній моделі комплексного показника стану поверхневого шару деталі (4.4) і дозволяє підтвердити достовірність математичної моделі циклічної довговічності (4.5) для сталі 40Х.

4.3. Математична модель процесу токарного оброблення деталей

Оптимізація технологічних умов оброблення деталей [118] включає рішення різних технологічних, економічних, конструкційних та організаційних задач. В якості критеріїв оптимальності використовують:

- критерій мінімальної технологічної собівартості виконання операції;
- критерій максимальної продуктивності, що забезпечує найменші затрати часу на оброблення;
- критерій точності оброблення, стану поверхневого шару тощо.

При розв'язанні задачі технологічного забезпечення необхідної циклічної довговічності деталей в якості критерію оптимальності вибрано максимальну продуктивність процесу фінішного токарного оброблення [119] у вигляді:

$$f = n \cdot S, \quad (4.3)$$

де n – частота обертання шпинделя, об/хв., S – повздовжня подача, мм/об.

При цьому
$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}. \quad (4.4)$$

Тоді

$$f(S, V) = \frac{1000 \cdot S \cdot V}{\pi \cdot D}. \quad (4.5)$$

Визначення раціональних значень подачі та швидкості різання здійснюється із області допустимих рішень. При розв'язанні даної задачі ця область задається множиною їх обмежень на процес токарного оброблення.

1. Обмеження по подачі:

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, \quad (4.6)$$

де S_{\min} та S_{\max} – відповідно мінімальне та максимальне допустиме значення подачі, мм/об.

2. Обмеження по швидкості різання:

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}, \quad (4.7)$$

$$V_{\min} = \frac{\pi D_0 n_{\min}}{1000}, \quad V_{\max} = \frac{\pi D_0 n_{\max}}{1000}, \quad (4.8)$$

де D_0 – діаметр заготовки до обробки, мм; V_{\min} , V_{\max} – мінімальна та максимальна швидкість різання, м/хв; n_{\min} , n_{\max} – мінімальна та максимальна частота обертання шпинделя, об/хв.

3. Обмеження по допустимій силі різання:

$$P_x = 10C_{Px} h^{x_{Px}} s^{y_{Px}} v^{n_{Px}} K_{Px} \leq P_{\max i. \zeta}, \quad (4.9)$$

де P_x – осьова складова сили різання, Н; $P_{\max o.3.}$ – максимальне осьове зусилля верстату, Н; C_{Px} – постійна; x_{Px} , y_{Px} , n_{Px} – показники степені; K_{Px} – поправочний коефіцієнт, що є добутком коефіцієнтів K_{mp} , $K_{\phi Px}$, $K_{\gamma Px}$, $K_{\lambda Px}$, K_{rPx} , при цьому $K_{mp} = \left(\frac{\sigma_B}{750} \right)^n$, де σ_B – тимчасовий опір (границя міцності) оброблюваного матеріалу, МПа, n – показник степені.

Числові значення постійної C_{Px} , показників степені x_{Px} , y_{Px} , n_{Px} та складових поправочного коефіцієнту K_{Px} наведені в [118, 120, 121].

4. Обмеження по допустимій потужності різання:

$$N_{piz} \leq N_{un}, \quad (4.10)$$

де N_{piz} – ефективна потужність, що необхідна для різання, кВт; N_{un} – потужність, яку розвиває верстат на шпинделі [122], кВт:

$$N_{un} = N_{\partial\phi} \eta, \quad (4.11)$$

де $N_{\partial\phi}$ – потужність двигуна головного приводу верстату, кВт; η – коефіцієнт корисної дії головного приводу верстату.

Згідно з [118, 120, 123, 124] ефективна потужність, що необхідна для токарного оброблення розраховується за формулою:

$$N_{piz} = \frac{P_z v}{1000 \cdot 60}, \quad (4.12)$$

де P_z – тангенціальна складова сили в [118] визначається наступним чином

$$P_z = 10C_{Pz} h^{x_{Pz}} s^{y_{Pz}} v^{n_{Pz}} K_{Pz}, \quad (4.13)$$

де C_{Pz} – постійна; x_{Pz} , y_{Pz} , n_{Pz} – показники степені; K_{Pz} – поправочний коефіцієнт, що є добутком коефіцієнтів K_{mp} , $K_{\phi Pz}$, $K_{\gamma Pz}$, $K_{\lambda Pz}$, K_{rPz} .

Числові значення постійної C_{Pz} , показників степені x_{Pz} , y_{Pz} , n_{Pz} та складових поправочного коефіцієнту K_{Pz} наведені в [118, 120, 123, 124].

Тоді, враховуючи формули (4.11-4.13) нерівність (4.10) набуде наступного вигляду:

$$N_{\partial\delta}\eta \geq \frac{10C_{Pz}h^{x_{Pz}}s^{y_{Pz}}v^{n_{Pz}}K_{Pz}}{1020 \cdot 60}. \quad (4.14)$$

5. Обмеження по точності оброблення:

$$\Delta_{\Sigma} \leq 0,5 \cdot TD, \quad (4.15)$$

де Δ_{Σ} – сумарна похибка оброблення, мкм; TD – величина допуску, що відповідає квалітету точності розміру, який витримується, мкм [125].

Сумарна похибка включає наступні похибки:

Δ_y – коливання пружних деформацій технологічної системи під дією нестабільності навантажень(сил різання, сил інерції тощо), що діють в системі змінної жорсткості; $\Delta\epsilon_y$ – встановлення заготовки в пристосування; Δ_n –налагодження технологічної системи на розмір, який витримується; Δ_u – в результаті розмірного зносу різального інструменту. Отже,

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_y + \Delta\epsilon_y + \Delta_n + \Delta_u. \quad (4.16)$$

При цьому $\Delta_y = y_{\max} - y_{\min} = W_{\max}P_{\max} - W_{\min}P_{\min}, \quad (4.17)$

де W_{\max}, W_{\min} – відповідно найбільша і найменша піддатливість системи, мкм/Н; P_{\max}, P_{\min} – максимальне і мінімальне значення складової сили різання, що співпадає з напрямком розміру, який витримується, Н. Тобто це радіальна складова сили різання, що визначається за формулою:

$$P_y = 10C_{Py}h^{x_{Py}}s^{y_{Py}}v^{n_{Py}}K_{Py}. \quad (4.18)$$

де C_{Py} – постійна; x_{Py}, y_{Py}, n_{Py} – показники степені; K_{Py} – поправочний коефіцієнт, що є добутком коефіцієнтів $K_{\text{мр}}, K_{\phi Py}, K_{\gamma Py}, K_{\lambda Py}, K_{rPy}$.

Числові значення постійної C_{Py} , показників степені x_{Py}, y_{Py}, n_{Py} та складових поправочного коефіцієнту K_{Py} наведені в [118, 120, 123, 124].

Значення похибок встановлення заготовки в пристосування $\Delta\epsilon_y$ в залежності від пристосування, виду заготовки та її розмірів, а також налагодження технологічної системи на розмір, який витримується Δ_n , що в

загальному випадку залежить від похибки регулювання положення інструменту та похибки вимірювання розмірів деталі наведено в [126].

Складова сумарної похибки, що виникає в результаті розмірного зносу різального інструменту, розраховується за формулою:

$$\Delta_u = \frac{L_n}{1000} u_0, \quad (4.19)$$

де L_n – повна довжина шляху різання для партії деталей; u_0 – відносний розмірний знос різця для даних умов виконання операції, орієнтовні значення якого наведені в [126, 127].

Довжина шляху різання при точінні однієї заготовки $L_\partial = \frac{\pi D l_\partial}{1000 s}$, де

D – діаметр оброблюваної поверхні, мм; l_∂ – довжина оброблюваної поверхні, мм; s – подача, мм/об. Довжина шляху різання L_N для партії заготовок N , що оброблюються в період між підналадками верстату – $L_N = L_\partial N$. Тоді з метою урахування інтенсивного початкового зносу, отриману розрахункову довжину різання збільшуємо на $L_n = 1000$ мм, отже $L_n = L_N + L_n$. Звідси

$$\Delta_u = \left(\frac{\pi D l_\partial N}{1000 s} + L_n \right) \cdot u_0 / 1000. \quad (4.20)$$

6. Обмеження по стійкості інструменту:

$$T \geq T_{необ}, \quad (4.21)$$

де $T_{необ}$ – необхідна стійкість інструменту.

Період стійкості може бити визначений за формулою [120]:

$$T = \left(\frac{C_V K_V}{V h^x S^y} \right)^{1/m}, \quad (4.22)$$

де C_V – постійна, x , y , m – показники степені, K_V – поправочний коефіцієнтів, що враховують вплив матеріалу заготовки K_{mV} , стану поверхневого шару K_{nV} , матеріалу інструмента K_{uV} :

$$K_V = K_{MV} K_{nV} K_{uV}. \quad (4.23)$$

При цьому

$$K_{MV} = K_r \left(\frac{750}{\sigma_B} \right)^{n_V}, \quad (4.24)$$

де K_r – коефіцієнт; n_V – показник степені.

Числові значення постійних, коефіцієнтів та показників степені із формул (4.22)–(4.24) представлені в [120].

7. Обмеження по шорсткості:

$$Ra \leq Ra_{необ}, \quad (4.25)$$

де $Ra_{необ}$ – необхідна величина шорсткості; Ra – величина шорсткості після обробки.

Середня висота профілю шорсткості в загальному випадку для всіх методів механічного оброблення визначається рівністю [38, 126, 128]:

$$R_Z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (4.26)$$

де h_1 – складова профілю шорсткості, яка зумовлена геометрією та кінематикою переміщення робочої частини інструменту; h_2 – складова профілю шорсткості, яка залежить від коливань інструменту відносно оброблюваної поверхні; h_3 – складова профілю шорсткості, яка зумовлена пластичною деформацією в зоні контакту інструменту та заготовки; h_4 – складова профілю шорсткості, яка визначається шорсткістю робочої частини інструменту.

Величина h_1 при токарному обробленні визначається за наступними залежностями:

1) при $\varphi < \arcsin \frac{s}{2r}$ та $\varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r}$:

$$h_1 = \frac{r(1 - \cos \varphi)}{\cos \gamma} + \frac{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi_1 [s - r(\sin \varphi + \sin \varphi_1)] - r \operatorname{tg} \varphi (\cos \varphi_1 - \cos \varphi)}{\cos \gamma (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1)}; \quad (4.27)$$

2) при $\varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r}$ та $\varphi_1 \geq \arcsin \frac{s}{2r}$:

$$h_1 = \frac{2r - \sqrt{4r^2 - s^2}}{\cos \gamma}; \quad (4.28)$$

3) при найбільш розповсюджених випадках $\varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r}$ та $\varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r}$:

$$h_1 = \frac{r(1 - \cos \varphi_1) + \sin \varphi_1 [s \cdot \cos \varphi_1 - \sqrt{s \cdot \sin \varphi_1 (2r - s \cdot \sin \varphi_1)}]}{\cos \gamma}; \quad (4.29)$$

4) при найменш характерний випадках $\varphi < \arcsin \frac{s}{2r}$ та $\varphi_1 \geq \arcsin \frac{s}{2r}$:

$$h_1 = \frac{2(1 - \cos \varphi) + \sin \varphi [s \cdot \cos \varphi - \sqrt{s \cdot \sin \varphi (2r - s \cdot \sin \varphi)}]}{\cos \gamma}, \quad (4.30)$$

де φ і φ_1 – головний та допоміжний кути різального інструменту в плані; γ – передній кут; r – радіус при вершині різальної частини інструменту, s – подача, мм/об.

Складова профілю шорсткості h_2 визначається амплітудою коливань вершини інструмента відносно оброблюваної поверхні при його проходженні по виступу чи впадині початкової шорсткості і нерівномірністю твердості заготовки на різних ділянках оброблюваної поверхні:

$$h_2 = \frac{c_Y s^{y_{py}} v^{z_{py}} [HB_{\max}^n h^{x_{py}} - HB_{\min}^n (t - R_{Z_{\text{поч}}})^{x_{py}}]}{HB_{cp}^n j_{СПЗ}}, \quad (4.31)$$

де c_Y – коефіцієнт; y_{py} , z_{py} , n , x_{py} – показники степені; $R_{Z_{\text{поч}}}$ – початкова середня висота профілю шорсткості оброблюваної поверхні, мкм; HB_{\max} та HB_{\min} – коливання твердості заготовки; HB_{cp} – середня твердість заготовки; $j_{СПЗ}$ – жорсткість технологічної системи, Н/мкм.

Пластичні деформації оброблюваного матеріалу в зоні різання призводять до збільшення висоти шорсткості на величину h_3 , яка розраховується за формулами:

1) при $\varphi < \arcsin \frac{s}{2r}$ та $\varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r}$:

$$h_3 = \frac{b_{зсув}}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1}}; \quad (4.32)$$

2) при $\varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r}$ та $\varphi_1 \geq \arcsin \frac{s}{2r}$:

$$h_3 = \frac{b_{зсув} (2s + b_{зсув})}{32r}; \quad (4.33)$$

при $\varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r}$ та $\varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r}$:

$$h_3 = \frac{b_{зсув}}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1} + \frac{2r}{s}}; \quad (4.34)$$

при $\varphi < \arcsin \frac{s}{2r}$ та $\varphi_1 \geq \arcsin \frac{s}{2r}$:

$$h_3 = \frac{b_{зсув}}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{2r}{s}}. \quad (4.35)$$

Величина пластичного відтиску $b_{зсув}$ при лезвійному обробленні визначається за формулою:

$$b_{зсув} = 0,5\rho \left(1 - \frac{\tau_{зсув}}{\sqrt{\tau_{зсув}^2 + \sigma_T^2}} \right), \quad (4.36)$$

де $\tau_{зсув}$ – міцність оброблюваного матеріалу на зсув; σ_T^2 – границя текучості оброблюваного матеріалу; ρ – радіус закруглення допоміжної різальної крайки.

Складова висоти шорсткості h_4 визначається середньою висотою профілю шорсткості на вершині різця, тобто $h_4 = Rz_{в.р.}$ і залежить від технології затоки та режимів різання.

Відповідно до [38, 126] $Ra = 0,2Rz$, тоді в загальному вигляді розрахункове значення середнього арифметичного відхилення профілю Ra , в залежності від геометрії інструменту та подачі, визначається за формулами:

$$\begin{aligned}
 & \text{– при } \varphi < \arcsin \frac{s}{2r} \text{ та } \varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r} : \\
 Ra = 0,2 & \left(\frac{r(1 - \cos \varphi)}{\cos \gamma} + \frac{tg \varphi tg \varphi_1 [s - r(\sin \varphi + \sin \varphi_1)] - rtg \varphi (\cos \varphi_1 - \cos \varphi)}{\cos \gamma (tg \varphi + tg \varphi_1)} + \right. \\
 & \left. + \frac{c_Y s^{y_{PY}} v^{z_{PZ}} [HB_{\max}^n h^{x_{PY}} - HB_{\min}^n (t - R_{Z_{\text{поч}}})^{x_{PY}}]}{HB_{cp}^n j_{СПЗ}} + \frac{0,5\rho \left(1 - \frac{\tau_{зcy\theta}}{\sqrt{\tau_{зcy\theta}^2 + \sigma_T^2}}\right)}{\frac{1}{tg \varphi} + \frac{1}{tg \varphi_1}} + Rz_{\text{в.р.}} \right); \quad (4.37)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{– при } \varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r} \text{ та } \varphi_1 \geq \arcsin \frac{s}{2r} : \\
 Ra = 0,2 & \left(\frac{2r - \sqrt{4r^2 - s^2}}{\cos \gamma} + \frac{c_Y s^{y_{PY}} v^{z_{PZ}} [HB_{\max}^n h^{x_{PY}} - HB_{\min}^n (t - R_{Z_{\text{поч}}})^{x_{PY}}]}{HB_{cp}^n j_{СПЗ}} + \right. \\
 & \left. + \frac{0,5\rho \left(1 - \frac{\tau_{зcy\theta}}{\sqrt{\tau_{зcy\theta}^2 + \sigma_T^2}}\right) \left(2s + 0,5\rho \left(1 - \frac{\tau_{зcy\theta}}{\sqrt{\tau_{зcy\theta}^2 + \sigma_T^2}}\right)\right)}{32r} + Rz_{\text{в.р.}} \right); \quad (4.38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{– при } \varphi \geq \arcsin \frac{s}{2r} \text{ та } \varphi_1 < \arcsin \frac{s}{2r} : \\
 Ra = 0,2 & \left(\frac{r(1 - \cos \varphi_1) + \sin \varphi_1 [s \cdot \cos \varphi_1 - \sqrt{s \cdot \sin \varphi_1 (2r - s \cdot \sin \varphi_1)}]}{\cos \gamma} + \right. \\
 & \left. + \frac{c_Y s^{y_{PY}} v^{z_{PZ}} [HB_{\max}^n h^{x_{PY}} - HB_{\min}^n (t - R_{Z_{\text{поч}}})^{x_{PY}}]}{HB_{cp}^n j_{СПЗ}} + \frac{0,5\rho \left(1 - \frac{\tau_{зcy\theta}}{\sqrt{\tau_{зcy\theta}^2 + \sigma_T^2}}\right)}{\frac{1}{tg \varphi_1} + \frac{2r}{s}} + Rz_{\text{в.р.}} \right); \quad (4.39)
 \end{aligned}$$

$$\text{– при } \varphi < \arcsin \frac{s}{2r} \text{ та } \varphi_1 \geq \arcsin \frac{s}{2r} :$$

$$Ra = 0,2 \left(\frac{2(1 - \cos \varphi) + \sin \varphi [s \cdot \cos \varphi - \sqrt{s \cdot \sin \varphi (2r - s \cdot \sin \varphi)}]}{\cos \gamma} + \frac{c_Y s^{y_{PY}} v^{z_{PZ}} [HB_{\max}^n h^{x_{PY}} - HB_{\min}^n (t - R_{Z_{\text{поч}}})^{x_{PY}}]}{HB_{cp}^n j_{СПЗ}} + \frac{0,5 \rho \left(1 - \frac{\tau_{зсув}}{\sqrt{\tau_{зсув}^2 + \sigma_T^2}} \right)}{\frac{1}{\tan \varphi} + \frac{2r}{s}} + Rz_{\text{в.р.}} \right). \quad (4.40)$$

8. Обмеження по циклічній довговічності:

$$N_{\text{необ}} \leq N_{\text{розр}}. \quad (4.41)$$

Відповідно до (4.5) дана нерівність набуде вигляду:

$$N_{\text{необ}} \leq e^{14.437 + 0.0048V + 13.006S - 13.19\sigma + 0.002VS - 0.002V\sigma - 5.941S\sigma + 0.0000004V^2 + 2.929S^2 + 3.013\sigma^2} \quad (4.42)$$

Враховуючи технологічні обмеження, що представлені вище, загальний вигляд математичної моделі розв'язання задачі оптимізації режимів токарного оброблення деталей буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} S_{\min} &\leq S \leq S_{\max}; \\ \frac{\pi D_0 n_{\min}}{1000} &\leq V \leq \frac{\pi D_0 n_{\max}}{1000}; \\ P_{\max \text{ о.з.}} &\geq P_x = 10 C_{Px} h^{x_{Px}} s^{y_{Px}} v^{n_{Px}} K_{Px}; \\ N_{\text{дог}} \eta &\geq \frac{10 C_{Pz} h^{x_{Pz}} s^{y_{Pz}} v^{n_{Pz}} K_{Pz}}{1000 \cdot 60}; \\ \max f(S, V) \text{ при } &0,5 \cdot TD \geq \Delta_{\Sigma}; \\ &T \leq \left(\frac{C_V K_V}{V h^x S^y} \right)^{1/m}; \\ &Ra_{\text{необ}} \geq Ra_{\text{розр}} \\ &N_{\text{необ}} \leq N_{\text{розр}} \end{aligned} \quad (4.43)$$

Таким чином, для визначення раціональних режимів токарного оброблення деталей створена математична модель, що враховує циклічну довговічність матеріалу деталі, яка виготовлена зі сталі 40Х.

4.3. Математична модель процесу токарного оброблення деталей з урахуванням характеристик матеріалу деталі

В зв'язку з тим, що розробка математичних залежностей циклічної довговічності для кожного конструкційного матеріалу вимагає значних затрат часу та матеріальних ресурсів. Тому пропонується для отримання подібної залежності для будь якого представника класифікаційної групи використовувати методику врахування реальних характеристик досліджуваного матеріалу, що наведена в підрозділі 2.3.3. Тому для отримання математичних моделей циклічної довговічності деталей, що виготовлені із конструкційних матеріалів групи легованих хромистих сталей, до якої відноситься сталь 40X, застосована методика врахування їх реальних характеристик [94-98]. При цьому початковими даними є хімічний склад та фізико-механічні характеристики матеріалів даної класифікаційної групи [129], що представлені в таблицях 4.1, 4.2, а також режими їх термооброблення (табл. 4.3).

Таблиця 4.1. Хімічний склад матеріалів
групи конструкційних легованих хромистих сталей

Марка сталі	C, %	Mn, %	S, %	P, %	Cr, %	Si, %	Ni, %	Cu, %	N, %
15X	0,18	0,7	0,035	0,035	1,0	0,37	0,3	0,3	0,008
15XA	0,17	0,7	0,025	0,025	1,0	0,37	0,3	0,3	0,008
20X	0,23	0,8	0,035	0,035	1,0	0,37	0,3	0,3	0,008
30X	0,32	0,8	0,035	0,035	1,1	0,37	0,3	0,3	0,008
30XPA	0,33	0,8	0,025	0,025	1,3	0,37	0,3	0,3	0,008
35X	0,39	0,8	0,035	0,035	1,1	0,37	0,3	0,3	0,008
38XA	0,42	0,8	0,025	0,025	1,1	0,37	0,3	0,3	0,008
40X	0,44	0,8	0,035	0,035	1,1	0,37	0,3	0,3	0,008
45X	0,49	0,8	0,035	0,035	1,1	0,37	0,3	0,3	0,008
50X	0,54	0,8	0,035	0,035	1,1	0,37	0,3	0,3	0,008

Таблиця 4.2. Фізико-механічні характеристики матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей.

Марка сталі	E, МПа	G, МПа	ρ , кг/м ³	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, кДж/м ²	НВ
15X	215000	83000	7830	490	690	12	45	690	179
15XA	200000	77000	7850	500	700	12	45	700	179
20X	216000	83000	7830	635	780	11	40	590	179
30X	208000	83000	7820	685	880	12	45	690	187
30ХРА	200000	77000	7850	1275	1570	9	40	490	241
35X	214000	83000	7850	735	910	11	45	690	197
38XA	196000	83000	7850	785	930	12	50	880	207
40X	214000	85000	7850	785	980	10	45	590	217
45X	206000	78000	7820	835	1030	9	45	490	229
50X	207000	78000	7820	885	1080	9	40	390	229

Таблиця 4.3. Види та режими термооброблення матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

Марка сталі	Гартування			Відпуск	
	Температура, °C		Середовище охолодження	Температура, °C	Середовище охолодження
	1-го гартування або нормалізації	2-го гартування			
15X	880	770-820	Вода або мастило	180	Повітря або мастило
15XA	880	770-820	Вода або мастило	180	Повітря або мастило
20X	880	770-820	Вода або мастило	180	Повітря або мастило
30X	860	—	Мастило	500	Вода або мастило
30ХРА	900 повітря	860	Мастило	200	Повітря
35X	860	—	Мастило	500	Вода або мастило
38XA	860	—	Мастило	550	Вода або мастило
40X	860	—	Мастило	500	Вода або мастило
45X	840	—	Мастило	520	Вода або мастило
50X	830	—	Мастило	520	Вода або мастило

В результаті розв'язання задачі стиснення інформації [129], що представлена в таблицях 4.1–4.2 шляхом багатовимірного факторного аналізу згідно з методикою, що наведена в розділі 2, отримано латентні змінні, які з необхідною інформативністю характеризують матеріали групи. В якості

критерію вибору кількості латентних змінних прийнято власні значення кореляційної матриці початкових даних, що перевищують 1.

Із таблиці 4.4., де наведено значення власних векторів кореляційної матриці початкових даних та відповідні їм індивідуальні і накопичені дисперсії, видно, що для матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей чотири латентні змінні враховують 93,008% інформації, яка міститься в масивах початкових даних.

Значення факторних навантажень на компоненти для класифікаційної групи конструкційних легованих хромистих сталей наведено в таблиці 4.5, що дозволяють визначити латентні фактори за значеннями характеристик матеріалів, що входять до даної класифікаційної групи.

Таблиця 4.4. Власні значення кореляційної матриці початкових даних та відповідні їм індивідуальні і накопичені дисперсії характеристик матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

№ компонент	Початкові власні значення кореляційної матриці			Відібрані власні значення кореляційної матриці		
	Значення	Дисперсія кожної компоненти, %	Накопичена дисперсія, %	Значення	Дисперсія кожної компоненти, %	Накопичена дисперсія, %
1	6,200	44,282	44,282	6,200	44,282	44,282
2	3,968	28,343	72,625	3,968	28,343	72,625
3	1,834	13,102	85,728	1,834	13,102	85,728
4	1,019	7,280	93,008	1,019	7,280	93,008
5	0,511	3,649	96,657			
6	0,306	2,187	98,844			
7	0,089	0,636	99,480			
8	0,057	0,407	99,886			
9	0,016	0,114	100,000			
10	3,319E-16	2,370E-15	100,000			
11	3,336E-17	2,383E-16	100,000			
12	1,869E-17	1,335E-16	100,000			
13	-2,379E-17	-1,700E-16	100,000			
14	-2,539E-16	-1,814E-15	100,000			

Таблиця 4.5. Факторні навантаження на компоненти
для матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

Характеристики матеріалів	Факторні навантаження			
	1	2	3	4
E, МПа	-0,367	0,810	0,037	0,421
G, МПа	-0,536	0,284	0,692	0,330
ρ , кг/м ³	0,006	-0,690	0,262	0,487
σ_T , МПа	0,959	-0,122	0,122	0,178
σ_B , МПа	0,952	-0,144	0,043	0,207
δ , %	-0,883	-0,351	0,128	0,037
ψ , %	-0,455	-0,433	0,605	-0,396
KCU, кДж/м ²	-0,677	-0,553	0,459	0,005
HB	0,950	0,016	0,146	-0,145
C, %	0,640	0,307	0,491	-0,431
Mn, %	0,603	0,306	0,588	0,037
S, %	-0,189	0,964	0,128	-0,013
P, %	-0,189	0,964	0,128	-0,013
Cr, %	0,871	-0,235	0,189	0,233

На основі використання наведених в таблиці 4.5 факторних навантажень отримано латентні змінні для матеріалів класифікаційної групи, які надано в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6. Результати стиснення початкової інформації про хімічний склад та фізико-механічні характеристики матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

Матеріал	Латентні фактори			
	1	2	3	4
15X	-1,35222	0,33743	-0,68478	0,28964
15XA	-0,93546	-1,49985	-1,54586	-0,43188
20X	-0,63406	0,88406	-0,51765	1,03803
30X	-0,48851	0,40759	0,46798	-0,3087
30XPA	1,9725	-1,06507	-0,62992	1,36681
35X	-0,25526	0,30973	0,93282	0,79282
38XA	-0,2146	-1,62724	1,61836	-0,87978
40X	0,12051	0,53806	1,13993	0,7812
45X	0,74805	0,69949	-0,10406	-1,61514
50X	1,03906	1,01582	-0,67683	-1,033

Це дало можливість відповідно до методики порівняння досліджуваних об'єктів за їх параметрами, що представлена в розділі 2, визначити коефіцієнти узагальнених характеристик K_y , які враховують хімічний склад та фізико-механічні властивості кожного матеріалу даної групи.

Значення розрахованих коефіцієнтів узагальнених характеристик для конструкційних матеріалів класифікаційної групи легованих хромистих сталей наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7. Коефіцієнти узагальнених характеристик матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

Марка сталі	K_y
15X	1,155236
15XA	1,045567
20X	1,129624
30X	1,090127
30XPA	0,927003
35X	1,234588
38XA	1,050261
40X	1,198004
45X	0,790049
50X	0,738517

У зв'язку з тим, що експериментальні дослідження виконувалися над зразками зі сталі 40X, який в даному випадку можна вважати еталонним, тоді відносні коефіцієнти узагальнених характеристик конструкційних легованих хромистих сталей K_g матимуть значення, що представлені в таблиці 4.8.

Відповідно до визначених відносних коефіцієнтів, створюється математична модель циклічної довговічності від режимів токарного оброблення для будь якого матеріалу класифікаційної групи легованих хромистих сталей:

$$N(S, V, \sigma) = K_g \cdot e^k, \quad (4.44)$$

де $k = 14.437 + 0.0048V + 13.006S - 13.19\sigma + 0.002VS - 0.002V\sigma - 5.941S\sigma + + 0.0000004V^2 + 2.929S^2 + 3.013\sigma^2$.

Таблиця 4.8. Відносні коефіцієнти узагальнених характеристик матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей

Марка сталі	K_{ϵ}
15X	0,964301
15XA	0,872758
20X	0,942922
30X	0,909953
30XPA	0,77379
35X	1,030537
38XA	0,876676
40X	1
45X	0,659471
50X	0,616456

Тоді математична модель процесу токарного оброблення деталей для будь якого матеріалу групи конструкційних легованих хромистих сталей набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
 S_{\min} &\leq S \leq S_{\max}; \\
 \frac{\pi D_0 n_{\min}}{1000} &\leq V \leq \frac{\pi D_0 n_{\max}}{1000}; \\
 P_{\max \text{ о.з.}} &\geq P_x = 10 C_{P_x} h^{x_{P_x}} s^{y_{P_x}} v^{n_{P_x}} K_{P_x}; \\
 N_{\text{об}} \eta &\geq \frac{10 C_{P_z} h^{x_{P_z}} s^{y_{P_z}} v^{n_{P_z}} K_{P_z}}{1000 \cdot 60}; \\
 \max f(S, V) \text{ при} \quad &0,5 \cdot TD \geq \Delta_{\Sigma}; \\
 &T \leq \left(\frac{C_V K_V}{V h^x S^y} \right)^{1/m}; \\
 &Ra_{\text{необ}} \geq Ra \\
 &N_{\text{необ}} \leq K_{\epsilon} \cdot N_{\text{розр}}
 \end{aligned} \tag{4.45}$$

Таким чином, представлена математична модель процесу токарного оброблення деталей дозволяє використовувати результати експериментальних досліджень, що здійснені з одним матеріалом класифікаційної групи, для будь яких матеріалів даної групи з урахуванням дійсних їх характеристик.

4.4. Програма оптимізації режимів токарного оброблення

З метою визначення раціональних режимів токарного оброблення деталей, що забезпечують їх необхідну циклічну довговічності та максимальну продуктивність виготовлення, розроблено відповідне програмне забезпечення.

В основу методу оптимізації покладено метод ковзаючого допуску, опис якого наведено в розділі 2.

При розв'язанні задачі оптимізації застосовано математичну модель процесу токарного оброблення деталей, які виготовляються з матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей (4.45), що включає в якості цільової функції максимальну продуктивність процесу фінішного токарного оброблення та множину обмежень.

Програмне забезпечення розв'язання задачі оптимізації розроблено на мові програмування C#. Для виконання програми необхідно мати на ЕОМ встановлену ОС Windows 7 і вище, встановлений .Net Framework 4.5.2, 5МБ вільного дискового простору жорсткого диску та 2МБ вільної ОЗП.

Текст програми розв'язання задачі оптимізації режиму токарного оброблення представлено в додатку А.

Після запуску програми оптимізації на виконання на моніторі з'являється головне вікно програми, загальний вигляд якого представлено на рис. 4.9. В цьому вікні користувач у відповідному полі задає інформацію про інструмент, деталь, використовуване обладнання, допустимі похибки при виготовленні, початковий режим оброблення, а також експлуатаційне напруження циклу та необхідне значення циклічної довговічності.

Програма оптимізації режимів токарного оброблення

Різальний інструмент		Характеристики верстату	
Головний кут в плані	72.5	Максимальна потужність шпинделя	14.9 кВт
Допоміжний кут	72.5	Коефіцієнт корисної дії головного приводу верстату	0.8
Передній кут	-14	Максимальна частота обертання шпинделя	4000 об/хв
Кут нахилу головного леза	5	Мінімальна частота обертання шпинделя	400 об/хв
Радіус вершини різця	0.4 мм	Максимальне допустиме значення подачі, S max	6 мм/об
Період стійкості інструменту	35 хв	Мінімальне допустиме значення подачі, S min	0.005 мм/об
Відносний розмірний знос різця	0.7 мкм/км	Найбільша піддатливість системи	0.04 мм/кН
		Найменша піддатливість системи	0.035 мм/кН
		Максимально допустиме зусилля по осі X	0.1 кН

Оброблювана поверхня		Складові сумарної похибки	
Діаметр деталі	50 мм	Похибка установки заготовки в пристосування	2 мкм
Шорсткість поверхні	0.8 мкм	Похибка наладки технологічної системи	4 мкм
Діаметр заготовки до обробки	51 мм		
Довжина оброблюваної поверхні	60 мм		
Кількість деталей в партії	45 шт		

Початковий режим оброблення		Експлуатаційне напруження	
S	0.08 мм/об	Експлуатаційне напруження	0.45 ГПа
h	0.2 мм	Необхідна циклічна довговічність	75000 циклів
V	100 м/хв		

Розрахувати

Рис. 4.9. Головне вікно програми визначення раціональних режимів токарного оброблення

Виконання розрахунків розпочинається шляхом натискання кнопки «Розрахувати». При цьому відкривається вікно з меню вибору матеріалу оброблюваної деталі, матеріалу різальної частини інструменту та необхідний квалітет точності оброблюваної поверхні (рис. 4.10).

Марка матеріалу
15X

Квалітет точності
5

Оброблюючий матеріал
T5K12V

OK

Рис. 4.10. Вікно з меню вибору оброблюваного, інструментального матеріалів та квалітету точності оброблюваної поверхні

Пункти цього меню мають відповідні випадаючі списки. На рис. 4.11-4.13 показано випадаючі списки оброблюваних і інструментальних матеріалів та необхідний квалітет точності оброблюваної поверхні.

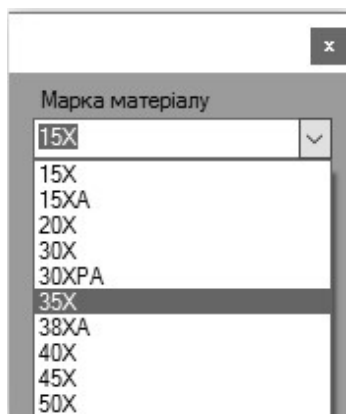


Рис. 4.11. Випадаючий
список найменувань
оброблюваних
матеріалів

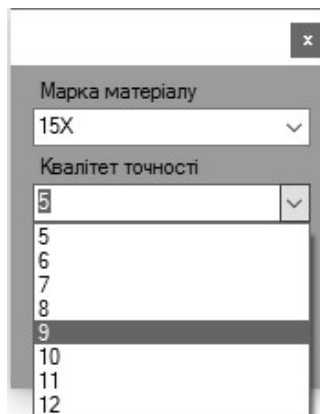


Рис. 4.12. Випадаючий
список квалітетів
точності оброблюваної
поверхні

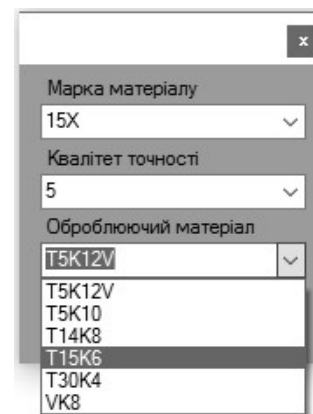


Рис. 4.13. Випадаючий
список найменувань
матеріалів різальної
частини інструменту

Вікно з результатами введеної інформації про оброблюваний матеріал, матеріал різальної частини інструменту та необхідний квалітет точності оброблюваної поверхні наведено на рис. 4.14.

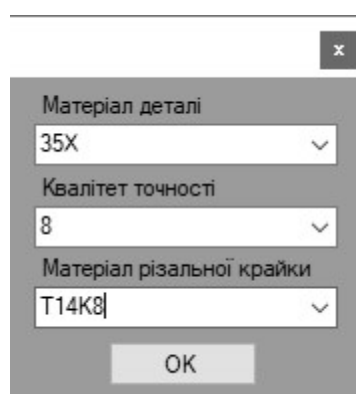


Рис. 4.14. Вікно зі введеною інформацією

Після цього натисканням кнопки «ОК» програма ініціює вікно з графічним представленням області допустимих рішень та визначеним раціональним режимом токарного оброблення, що наведено на рис. 4.15.

В нижній частині наведеного вікна представляються проміжні результати розв'язання задачі оптимізації та її кінцевий результат, що включає раціональний режим оброблення, значення продуктивності та циклічної довговічності.

Результати розв'язання задачі оптимізації зберігаються в вигляді текстового файлу (рис. 4.16) за вказаною адресою.

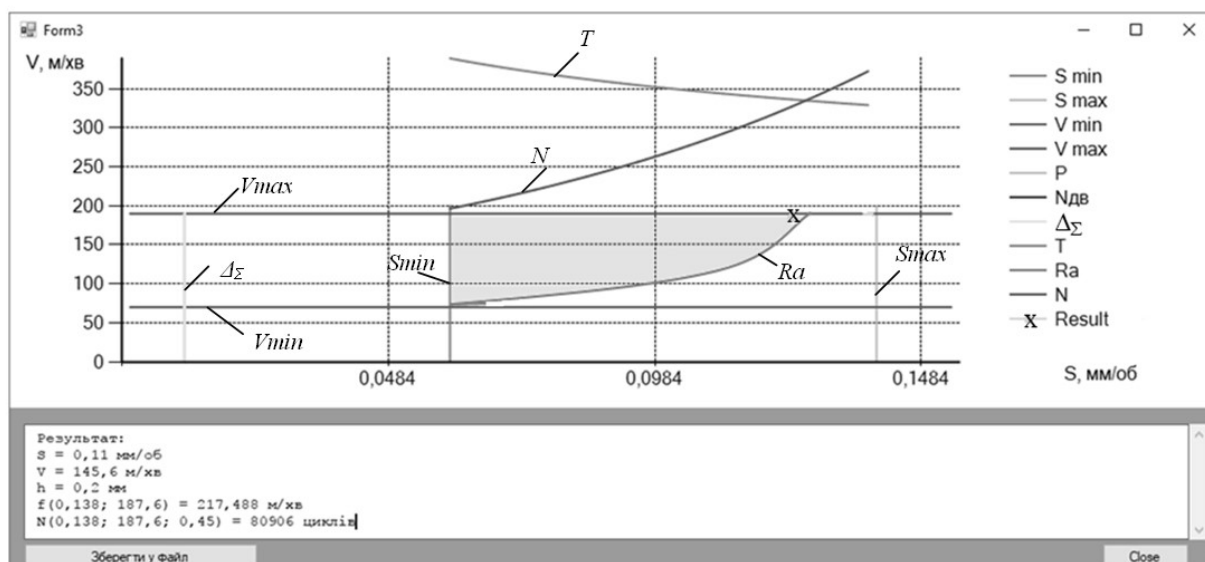


Рис. 4.15. Вікно з результатами розв'язання задачі оптимізації

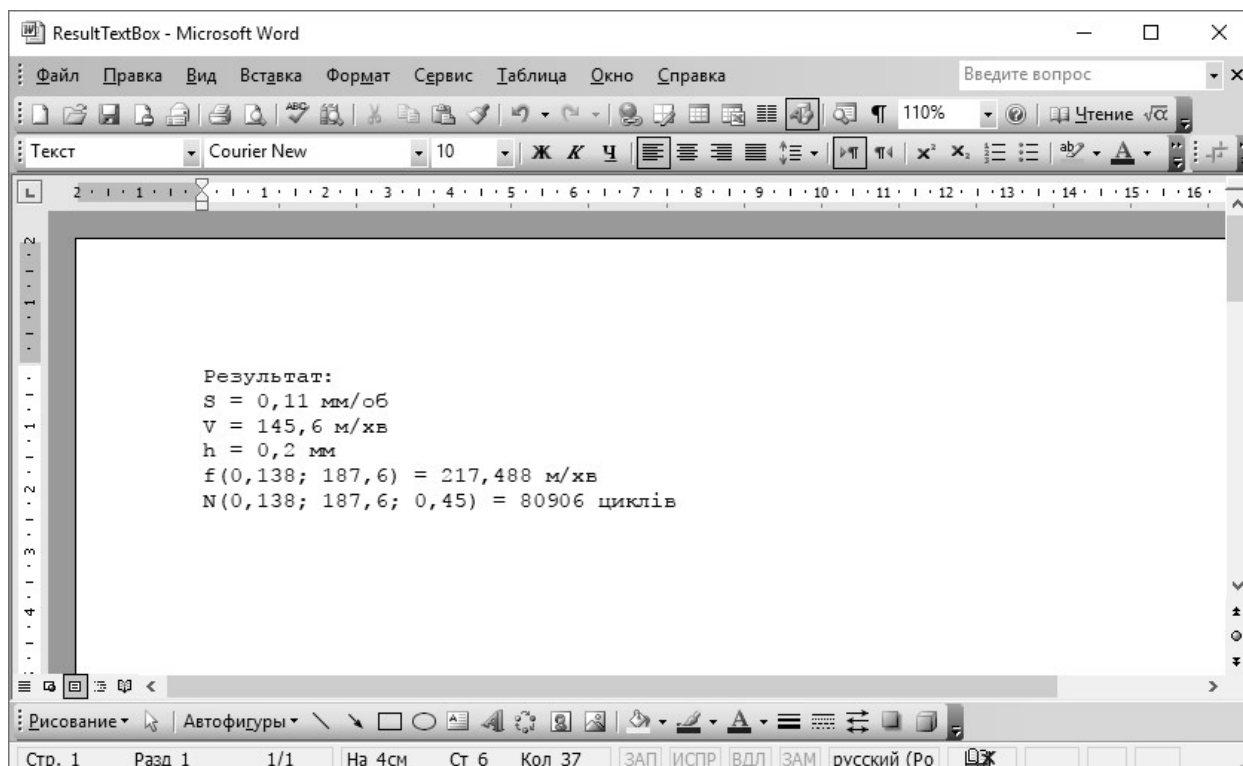


Рис. 4.16. Текстовий файл з результатами розв'язання задачі оптимізації

Таким чином, розроблене програмне забезпечення дає можливість на основі проведених експериментальних досліджень та оброблення їх результатів розв'язати задачу визначення раціональних режимів токарного оброблення деталей, що виготовляються із матеріалів групи конструкційних

легованих хромистих сталей, з візуальним представленням та збереженням у вигляді текстового файлу.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено математичну залежність циклічної довговічності для сталі 40Х, що дозволяє кількісно оцінити вплив режимів токарного оброблення та напруження циклу на циклічну довговічність деталі, а також використовувати її при розв'язанні оптимізаційної задачі.
2. Розроблено математичну модель процесу токарного оброблення, яка включає в якості цільової функції максимальну продуктивність процесу фінішного токарного оброблення та циклічну довговічність в множині обмежень, що дозволяє за методом ковзаючого допуску визначити раціональний режим фінішного токарного оброблення.
3. Виконано розрахунки коефіцієнтів узагальнених характеристик матеріалів групи конструкційних легованих хромистих сталей, що дозволяють на основі визначення математичної моделі циклічної довговічності одного матеріалу класифікаційної групи отримати відповідні математичні моделі для будь якого матеріалу даної групи з врахуванням їх характеристик.
4. Розроблено програму розв'язання задачі оптимізації режимів токарного оброблення, що дозволяє в автоматизованому режимі визначити раціональний режим токарного оброблення, який забезпечує максимальне значення продуктивності процесу фінішного токарного оброблення деталі при необхідній її циклічній довговічності в області допустимих рішень і враховує реальні характеристики матеріалу деталі.

РОЗДІЛ 5.

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛІ ЇЇ ТОКАРНИМ ОБРОБЛЕННЯМ

В розділі наведено методичні рекомендації з визначення раціональних умов токарного оброблення деталей на етапі технологічної підготовки виробництва з метою технологічного забезпечення максимальних значень циклічної довговічності деталей з урахуванням реальних умов експлуатації.

5.1. Рекомендації щодо впровадження результатів досліджень

Впровадження результатів дисертаційних досліджень на виробництві доцільно виконувати в такій послідовності.

1. Аналіз конструкції деталі та умов її експлуатації.
2. Визначення максимальних напружень в матеріалі деталі при експлуатації шляхом виконання кінцево-елементного аналізу.
3. Встановлення початкових даних процесу токарного оброблення:
 - хімічний склад та фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу;
 - конструктивні дані про деталь та її заготовку;
 - матеріал різальної частини інструменту та її геометричні параметри;
 - основні технічні характеристики обладнання, на якому виготовляється деталь;
4. Визначення раціональних режимів різання деталі за математичною моделлю процесу токарного оброблення, яка забезпечує максимальну продуктивність фінішного токарного оброблення деталі при її необхідній циклічній довговічності.

5.2. Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану деталей

Одним з конструктивних елементів різних механізмів та машин, що працюють в умовах змінних навантажень та виходять з ладу внаслідок втомного руйнування, є вали.

Як приклад дослідження умов експлуатації з метою визначення місця локалізації та значень напружень, які виникають в матеріалі деталі, розглядається деталь «Вал» поворотного механізму, що працює в умовах знакозмінних навантажень [130].

Ескіз валу, що виготовлений із сталі 40Х ГОСТ 4543-71, представлено на рис. 5.1.

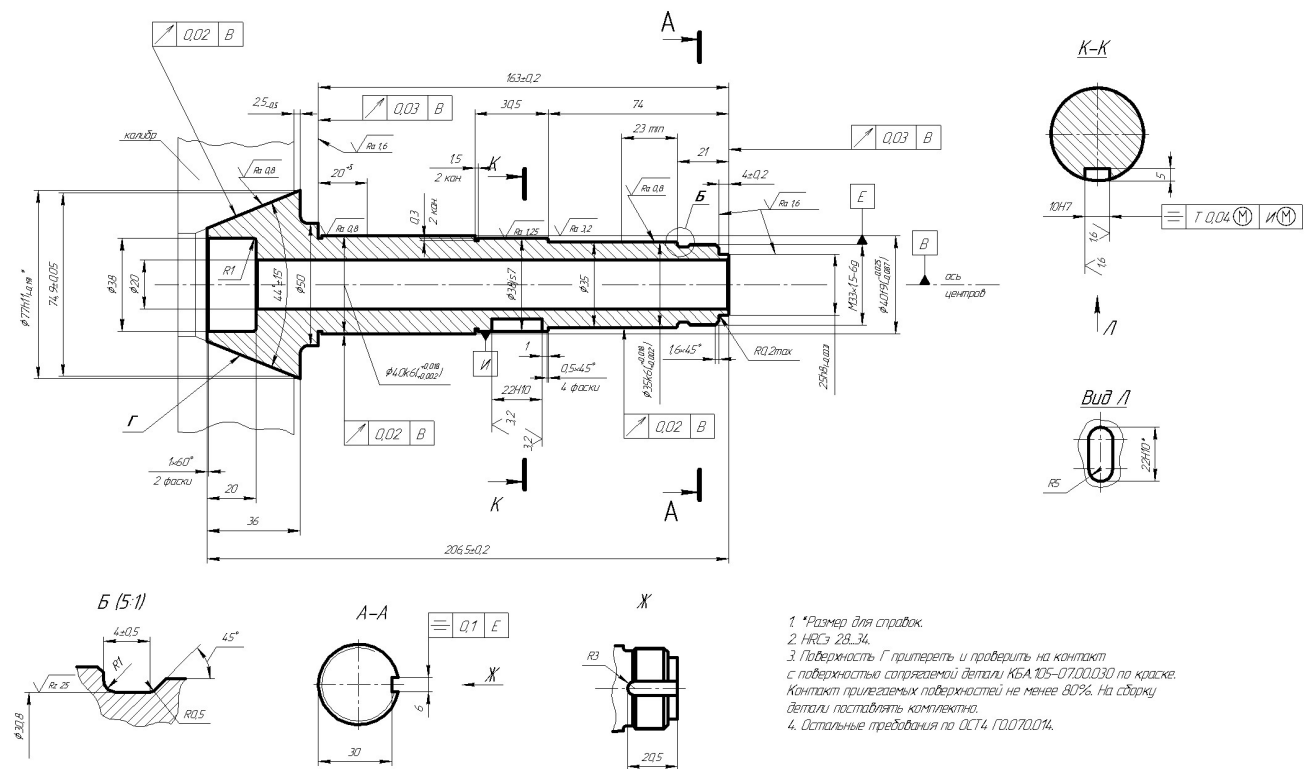


Рис. 5.1. Ескіз валу

Режими експлуатації поворотного механізму передбачають різку зміну величини та напрямку навантаження на вихідній шестерні, що призводить до утворення тріщин та подальшого втомного руйнування валу в місці з'єднання валу з шестернею через шпонку. Отже, вал постійно перебуває у складному напружено-деформованому стані.

Дослідження експлуатаційних умов роботи деталі в середовищі програмного комплексу FEMAP 10.2.0 згідно з методикою, що наведена в розділі 2, розпочинається зі створення її геометричної моделі (рис. 5.2).

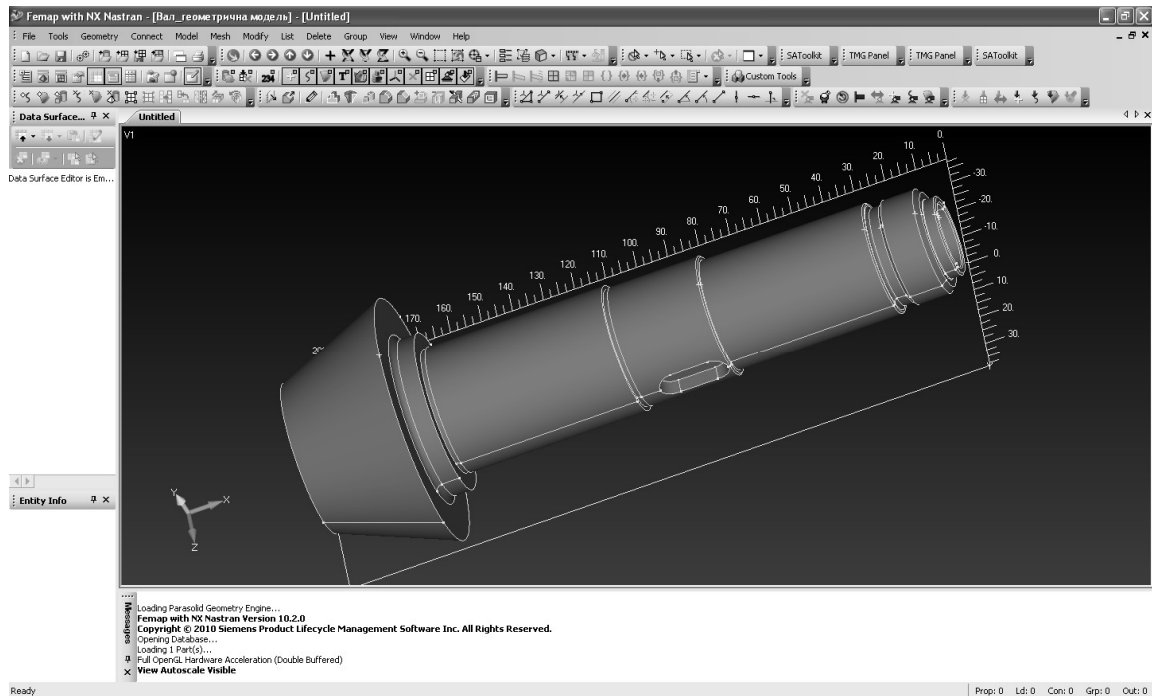


Рис. 5.2. Загальний вигляд геометричної моделі валу

На наступному етапі задавали властивості матеріалу валу (сталь 40Х ГОСТ 4543-71) та атрибути кінцевих елементів. Для введення цього матеріалу в діалоговій панелі «Define Material – Isotropic», що викликалась командою «Model→ Material...», вказували назву матеріалу та необхідні для рішення крайової задачі значення його фізико-механічних властивостей (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, густина матеріалу). Командою «Model→ Property...» ініціювали діалогову панель «Define Property», де кнопкою «Elem/Property Type...» викликали відповідну панель, в якій обрано тип кінцевих елементів «Solid» в секції «Volume Elements». Також встановлено опцію «Parabolic Elements» з метою призначення в КЕ другого порядку апроксимації майбутнього рішення, при цьому підвищується точність і час рішення. Для створення тетрагональної трьохвимірної кінцево-елементної сітки на основі утвореного «твердого» тіла застосовували команду «Mesh→ Geometry→ Solids...». Вона викликає діалогову панель

«Automesh Solids», в якій обрано раніше задані властивості KE, встановлено опцію «Midside Nodes», що створює проміжні вузли KE для апроксимації геометрії тіла. Це дозволяє апроксимувати криволінійні поверхні, що забезпечує більш точне вирішення задачі, але призводить до значного збільшення необхідної дискової та оперативної пам'яті та часу вирішення задачі. Після натискання кнопки «ОК» виконували генерація сітки кінцевих елементів, результат якої представлено на рис. 5.3.

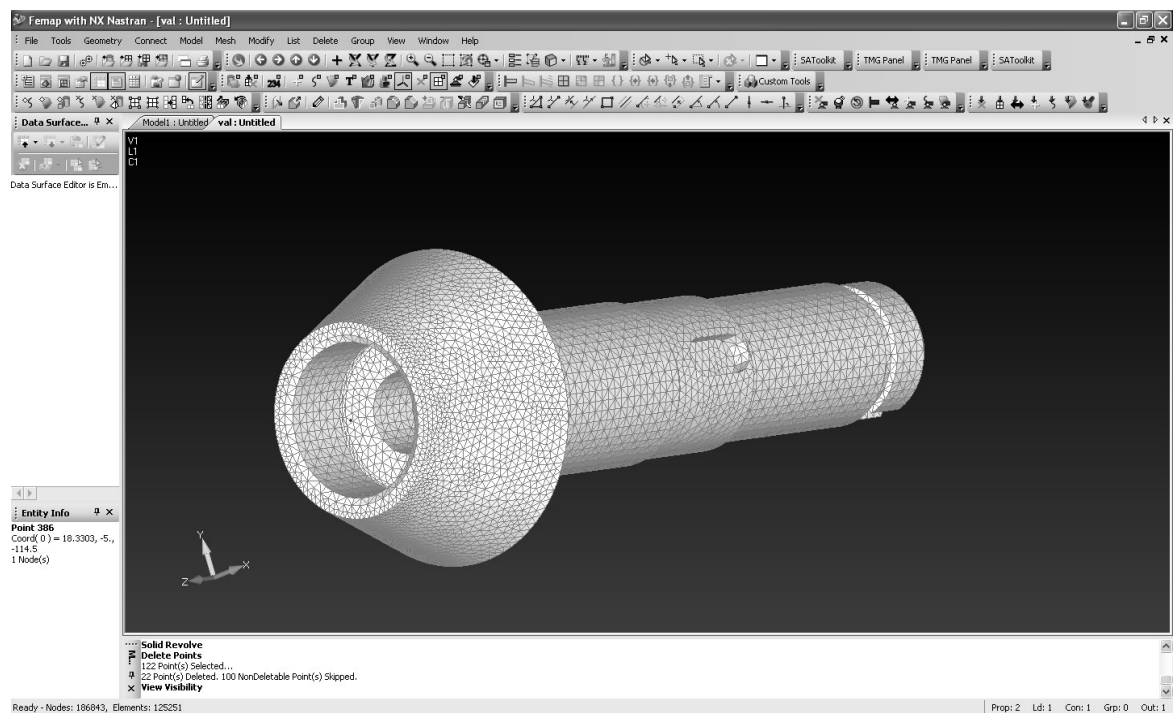


Рис. 5.3. Загальний вигляд кінцево-елементної моделі валу

На наступному етапі досліджень задавали граничні умови, що моделюють закріплення валу в механізмі його використання (граничні умови 1-го роду), яке на моделі відображалися у вигляді блакитних трикутників, цифра біля яких означає обмежувану кількість ступінь свободи (рис. 5.4.) Момент, що діє на конічну поверхню валу (граничні умови 2-го роду), моделювали за допомогою пари сил, при цьому задавали значення навантаження експлуатаційного навантаження у 1000 Н. Навантаження на моделі представляються у вигляді стрілок за напрямком навантаження та його числовим значенням (рис. 5.4).

Після цього етапу модель готова до виконання розрахунку напружено-деформованого стану. Командою «File→ Analysis...» викликали діалогову панель «Export Method». Після натискання кнопки «Create/Edit Set» створювали новий аналіз та кнопкою «Done» ініціювали процес виконання розрахунку.

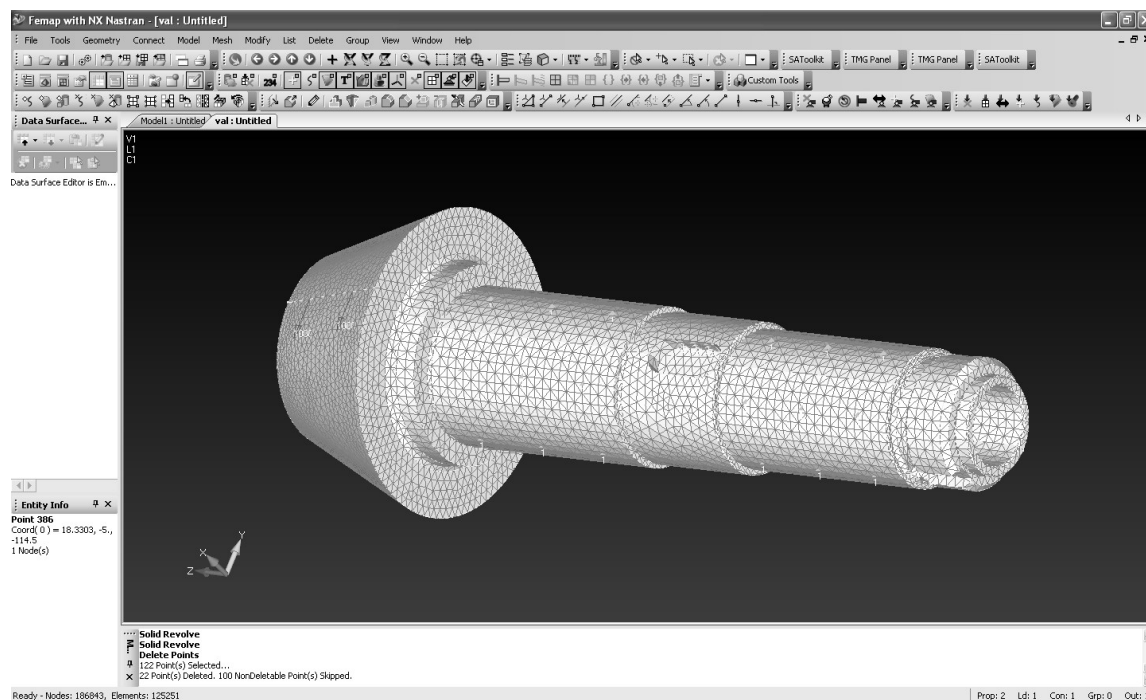


Рис. 5.4. Загальний вигляд кінцево-елементної моделі валу з граничними умовами 1-го роду

Для відображення напружено-деформованого стану вала командою «View→ Select» викликали відповідну діалогову панель «View Select», де в секції «Model Style» обрали опцію «Draw Model», в секції «Deformed Style» – «Deform», в секції «Contour Style» – «Beam Diagram». Кнопкою «Deformed and Contour Data...» ініціювали діалогову панель «Select PostProcessing Data». В секції «Output Vectors» зі списку обрали рядок «1..Total Translation», що відповідає сумарним векторним переміщенням, а в секції «Contour» – «60031..Solid Von Mises Stress», що відповідає еквівалентним напруженням за гіпотезою енергії формозміни (Мізеса) для об'ємних КЕ. Після натискання кнопки «OK» отримано кінцево-елементну модель в деформованому стані (рис. 5.5).

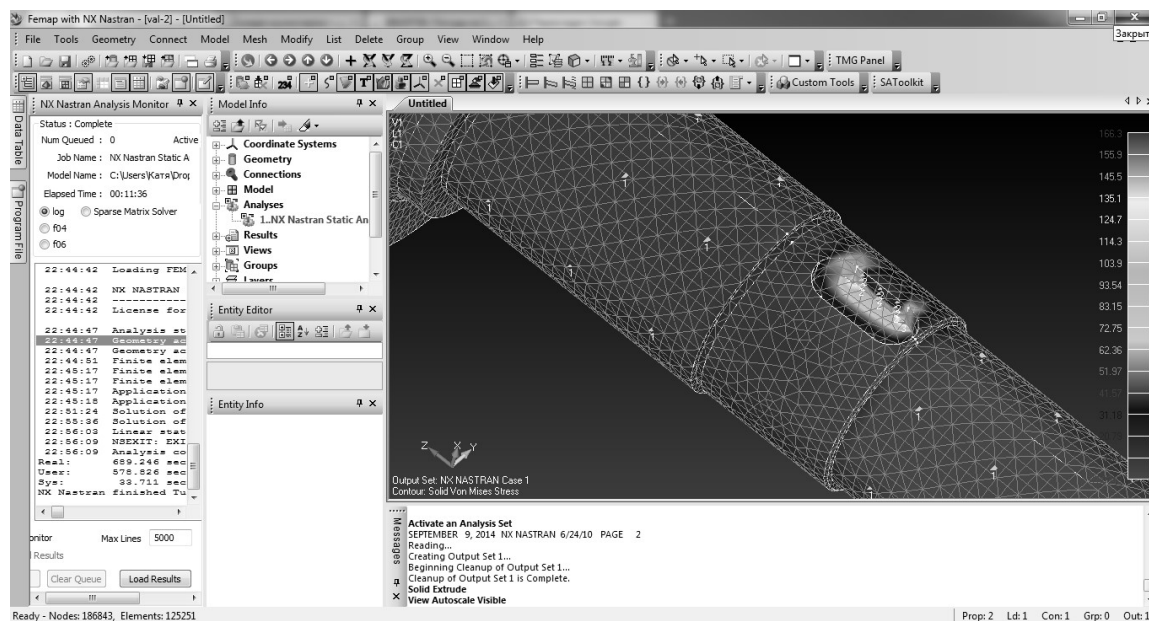


Рис. 5.5. Результати моделювання напружено-деформованого стану валу за експлуатаційних умов

В правій частині графічного інтерфейсу програми представлено кольорову діаграму, що відображає значення еквівалентних напружень за гіпотезою Мізеса для об'ємних КЕ. З рис 5.5 видно розподіл та значення напружень в зоні шпоночного пазу, при цьому найбільші напруження на циліндричній поверхні склали 400 МПа.

За допомогою програмного комплексу FEMAP 10.2.0 можна переглядати текстову інформацію про результати виконання аналізу. З цією метою використовується команда «List→ Output→ Unformatted...».

5.3. Використання методики технологічного забезпечення необхідного значення циклічної довговічності деталі «Вал» при токарному обробленні

Розглянемо приклад використання методики оптимізації режимів токарного оброблення деталі «Вал», що призначений для передачі крутного моменту в механізмі повороту. Ескіз деталі наведено на рис. 5.1. Дана деталь працює в умовах різкої зміни напрямку повороту, що спричиняє утворення значних напружень в матеріалі деталі. Значення цих напружень та місця їх

локалізації з урахуванням умов експлуатації отримано шляхом комп'ютерного моделювання в підрозділі 5.2.

Вал виготовлений із сталі 40Х ГОСТ 4543-71, хімічний склад та фізико-механічні характеристики якої наведено в таблиці 5.1. Заданий розробниками виробу ресурс роботи деталі складає $8,5 \cdot 10^4$ циклів. Фінішне оброблення деталі здійснювалось на токарному обробному центрі HAAS ST20, з використанням інструментального матеріалу T15K6. Відносний розмірний знос різця складає 0,7 мкм/км [126]. Необхідний період стійкості інструменту складає 60 хв. Геометричні параметри різальної частини інструменту представлено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.1. Хімічний склад та фізико-механічні характеристики сталі 40Х

C, %	Mn, %	S, %	P, %	Cr, %	Si, %	Ni, %	Cu, %	N, %
0,44	0,8	0,035	0,035	1,1	0,37	0,3	0,3	0,008
E, МПа	G, МПа	ρ , кг/м ³	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, кДж/м ²	HB
214000	85000	7850	785	980	10	45	590	217

Таблиця 5.2. Геометричні параметри різальної частини інструменту

Головний кут в плані φ°	72,5
Допоміжний кут в плані φ_1°	72,5
Передній кут γ°	-14
Кут нахилу головного леза λ°	5
Радіус при вершині різця r	0,4 мм

Для розв'язання задачі визначення раціональних режимів оброблення побудована математична модель, в якій використовуються основні технічні характеристики верстата та дані про деталь і заготовку, що враховують реальні умови оброблення наведено в таблицях 5.3 і 5.4.

Значення складових сумарної похибки токарного оброблення [126] представлено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.3. Основні технічні характеристики
токарного обробного центру HAAS ST20

Максимальна потужність шпинделя, N_{un}	14,9 кВт
Коефіцієнт корисної дії головного приводу верстату, η	0,8
Максимальне допустиме зусилля по осі X, $P_{x \max}$	20,46 кН
Максимальна частота обертання шпинделя, n_{\max}	4000 об/хв
Мінімальна частота обертання шпинделя, n_{\min}	400 об/хв
Максимальне допустиме значення подачі, S_{\max}	6 мм/об
Найбільша піддатливість системи, W_{\max}	0,04 мм/кН
Найменша піддатливість системи, W_{\min}	0,035 мм/кН

Таблиця 5.4. Дані про деталь та заготовку

Діаметр оброблюваної поверхні, D	Ø 38 мм
Шорсткість поверхні, Ra	1,25 мкм
Діаметр заготовки до обробки, D_0	Ø 40 мм
Довжина оброблюваної поверхні, l_o	30,5 мм
Загальна довжина проходу інструменту в напрямку подачі, L	40 мм
Квалітет точності оброблюваної поверхні	7
Кількість деталей в партії, n	25 шт

Таблиця 5.5. Дані для розрахунку сумарної похибки

Похибка установки заготовки в мембранний патрон, $\Delta \varepsilon_y$	5 мкм
Похибка налагодження технологічної системи, Δ_{π}	4 мкм

Введені початкові дані використовуються при формуванні обмежень математичної моделі в програмі оптимізації режимів токарного оброблення, як це показано на рис. 5.6.

Програма оптимізації режимів токарного оброблення

Різальний інструмент	
Головний кут в плані	72.5
Допоміжний кут	72.5
Передній кут	-14
Кут нахилу головного леза	5
Радіус вершини різця	0.4 мм
Період стійкості інструменту	60 хв
Відносний розмірний знос різця	0.7 мкм/км

Оброблювана поверхня	
Діаметр деталі	38 мм
Шорсткість поверхні	1.25 мкм
Діаметр заготовки до обробки	40 мм
Довжина оброблюваної поверхні	30.5 мм
Кількість деталей в партії	25 шт

Характеристики верстату	
Максимальна потужність шпинделя	14.9 кВт
Коефіцієнт корисної дії головного приводу верстату	0.8
Максимальна частота обертання шпинделя	4000 об/хв
Мінімальна частота обертання шпинделя	400 об/хв
Максимальне допустиме значення подачі, S max	6 мм/об
Мінімальне допустиме значення подачі, S min	0.005 мм/об
Найбільша піддатливість системи	0.04 мм/кН
Найменша піддатливість системи	0.035 мм/кН
Максимально допустиме зусилля по осі X	0.1 кН

Складові сумарної похибки	
Похибка установки заготовки в пристосування	5 мкм
Похибка налашки технологічної системи	4 мкм

Початковий режим оброблення

S	0.008 мм/об	Експлуатаційне напруження	0.4 ГПа
h	0.1 мм	Необхідна циклічна довговічність	85000 циклів
V	108 м/хв		

Розрахувати

Рис. 5.6. Головне вікно програми визначення раціональних режимів токарного оброблення з введеними початковими даними

Після натискання кнопки «Розрахувати» у вікні меню вибору матеріалу оброблюваної деталі, матеріалу різальної частини інструменту та якості точності оброблюваної поверхні вказували необхідні дані (рис. 5.7).

Матеріал деталі
40X

Квалітет точності
7

Матеріал різальної крайки
T15K6

OK

Рис. 5.7. Вікно зі введеною інформацією

Натискання кнопки «OK» ініціювало вікно з результатами розв'язання задачі оптимізації (рис. 5.8).

Таким чином за рахунок використання розроблених алгоритму та програми оптимізації

режимів токарного оброблення методом ковзаючого допуску та визначених у підрозділі 5.2. експлуатаційних напружень в матеріалі деталі визначено раціональні режими токарного оброблення деталі «Вал» ($S = 0,138$ мм/об;

$V = 187,6$ мм/хв; $h = 0,1$ мм), що забезпечують необхідну циклічну довговічність (не менше $N = 16 \cdot 10^4$, що більше заданого розробниками ресурсу роботи деталі) при її експлуатації та максимальну продуктивність виготовлення (значення оціночної цільової функції складає $f = 217$ м/хв).

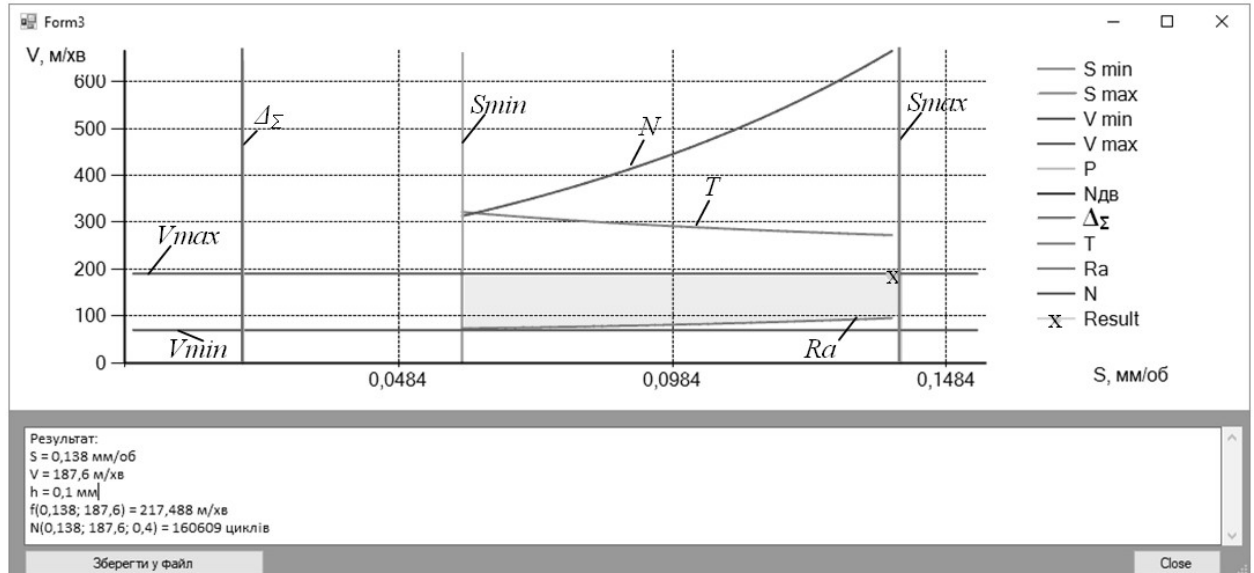


Рис. 5.8. Вікно з результатами розв'язання задачі оптимізації для деталі «Вал»

Наведений приклад показує, що запропонована методика дозволяє визначити раціональні умови токарного оброблення, яка забезпечує максимальні значення циклічної довговічності та продуктивності її виготовлення. За даною методикою є можливість прогнозування кількості циклів навантаження при експлуатації деталі до її руйнування, що дозволить уникнути аварійних ситуацій.

Висновки до розділу 5

1. Запропоновано послідовність дій на стадії технологічної підготовки виробництва, що дозволяє визначити раціональні умови токарного оброблення деталі та забезпечити максимальне значення продуктивності її фінішного токарного оброблення з урахуванням необхідної циклічної довговічності.

2. Застосування методу кінцевих елементів дозволило визначити місце локалізації та значення напружень і деформацій, що виникають під дією навантажень в процесі експлуатації деталей, та використовувати їх при розв'язанні задачі оптимізації режимів токарного оброблення.

3. Наведено приклад використання методики технологічного забезпечення необхідного значення циклічної довговічності та максимальної продуктивності виготовлення деталі «Вал», що дозволив визначити раціональні режими її токарного оброблення, які становлять: $S = 0,138$ мм/об; $V = 187,6$ мм/хв; $h = 0,1$ мм, що забезпечують необхідну циклічну довговічність не менше $N = 16 \cdot 10^4$, що задовольняє вимогам розробників виробу щодо ресурсу роботи деталі «Вал», та максимальну продуктивність виготовлення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача технологічного забезпечення необхідних значень циклічної довговічності матеріалу деталей шляхом встановлення закономірностей впливу токарного оброблення на стан поверхневого шару деталей та визначення його раціональних режимів.

1. За результатами аналізу параметрів, що характеризують опір втомі деталей при циклічних навантаженнях, аналізу впливу стану поверхневого шару і технологічних умов механічного оброблення деталей на їх опір втомі при експлуатації в умовах знакозмінних навантажень та аналізу методів визначення циклічної довговічності матеріалу деталей розроблена методика проведення експериментальних досліджень параметрів якості поверхневого шару та характеристик опору втомі, що дозволяє визначити взаємозв'язок втомних характеристик з технологічними умовами оброблення.

2. Результати експериментальних досліджень параметрів якості дозволили встановити, що режими токарного оброблення суттєво впливають на формування мікрогеометрії поверхні, мікротвердості та фазового складу приповерхневих шарів досліджуваних зразків. Встановлено, що на інтервалі дослідження ($V = 80 - 180$ м/хв.; $S = 0,08 - 0,12$ мм/об) при збільшенні подачі і швидкості різання комплексний показник стану поверхневого шару, що характеризується параметрами шорсткості R_{\max} , S_m та ступенем деформаційного зміцнення u_H , зростає. Це дозволяє зробити припущення про відповідне зростання циклічної довговічності та на можливість забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару відповідальних деталей шляхом встановлення відповідних режимів їх оброблення.

3. Результати експериментальних досліджень на втому дозволили створити математичну модель циклічної довговічності деталі, що враховує вплив режимів токарного оброблення та напруження циклу в матеріалі деталі при експлуатації. Аналіз результатів моделювання показав, що циклічна

довговічність при токарному обробленні зразків зі сталі 40X на інтервалі дослідження зростає при збільшенні як подачі, так і швидкості різання, при цьому вплив подачі має більш вагоме значення. Крім того, розроблена модель дозволяє за запропонованою методикою отримувати відповідні математичні моделі циклічної довговічності для множини матеріалів класифікаційної групи конструкційних легированих хромистих сталей з врахуванням їх характеристик. Це суттєво спрощує процес створення таких моделей та дозволяє зменшити витрати на проведення експериментальних досліджень.

4. Створена математична модель процесу фінішного токарного оброблення, яка включає в якості цільової функції максимальну продуктивність процесу та множину обмежень по подачі і швидкості різання, допустимим силі та потужності різання, точності оброблення, стійкості інструменту, шорсткості обробленої поверхні та по циклічній довговічності деталі, дозволяє за обраним методом нелінійної оптимізації визначити раціональний режим фінішного токарного оброблення з врахуванням фактичних характеристик складових технологічної обробної системи і умов експлуатації деталі.

5. Алгоритми і програми оптимізації, що представлені в роботі, дозволяють розв'язати багатовимірну нелінійну оптимізаційну задачу за критерієм максимальної продуктивності процесу фінішного токарного оброблення деталі та обмеженнями, що враховують її циклічну довговічність.

6. З метою оцінювання параметрів, що характеризують опір втомі матеріалу деталі, запропоновано визначати місце локалізації його найбільших напружень шляхом виконання комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану деталі, яка піддається навантаженням змінним за знаком та величиною.

7. Розроблені методичні рекомендації технологічного забезпечення необхідного значення циклічної довговічності деталей при їх фінішному

токарному обробленні дозволяють визначити його раціональні режими за критерієм максимальної продуктивності.

8. Результати практичного застосування методики технологічного забезпечення необхідного значення циклічної довговічності деталей при їх токарному обробленні на прикладі деталі типу «Вал» дозволили визначити раціональний режим різання ($S = 0,138$ мм/об; $V = 187,6$ мм/хв.; $h = 0,1$ мм), який забезпечує циклічну довговічність деталі не менше $N = 16 \cdot 10^4$, що більше заданого розробниками ресурсу роботи деталі при її експлуатації, та підвищити продуктивність її виготовлення в 1,2 рази.

9. Результати дисертаційних досліджень пройшли практичну апробацію на ПАТ «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики» (м. Київ), а також впроваджені в навчальний процес на кафедрі виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні навчальних дисциплін «Матеріалознавство», «Технологія приладобудування» та «Моделювання технологічних параметрів».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
2. Гуляев А.П. Металловведение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. / А.П. Гуляев. – М: Металлургия, 1986. – 544 с.
3. Драпкин Б.М. Свойства сплавов в экстремальном состоянии / Б.М. Драпкин, В.К. Кононенко, В.Ф. Безъязычный. – М.: Машиностроение, 2004. – 256 с.: ил.
4. Саргсян А.Е. Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности. Основы теории с примерами расчетов. – Учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 286 с: ил.
5. Березин И.Я. Сопротивление материалов. Усталостное разрушение металлов и расчеты на прочность и долговечность при переменных напряжениях: учебное пособие / И.Я. Березин, О.Ф. Чернявский; под общей редакцией О.Ф.Чернявского. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 47с.
6. Чуканов А.Н. Физико-механические закономерности формирования предельного состояния и развития локального разрушения в металлических материалах. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.Н. Чуканов. – Тула, 2001. – с. 387.
7. Гуляев А.П. Металловведение / А.П. Гуляев. – М: Издательство оборонной промышленности, 1951. – 484 с.
8. Лавренко Я.І. До питання визначення ресурсу конструктивних елементів при змінних навантаженнях / Я.І. Лавренко // Вісник НТУУ «КПІ» Серія Машинобудування. – 2009. – №56. – с. 88-92.
9. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин/ А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

10. Сулима А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных сплавов / А.М. Сулима, И.И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 1974. – 254 с.
11. Водолагин А.Л. Определение предела выносливости материала высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей после обработки лезвийными инструментами. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.Л. Водолагин. – Рыбинск, 2002. – с. 200.
12. Урядов С.А. Исследование взаимосвязи предела выносливости материала детали с технологическими условиями обработки при шлифовании. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / С.А. Урядов. – Рыбинск, 2010. – с. 149.
13. Сулима А.М. Основы технологи производства газотурбинных двигателей: Учебник для студентов авиац. спец. вузов / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1996. – 480с.: ил.
14. Елизаветин М.А. Технологические способы повышения долговечности машин / М.А. Елизаветин, А.Э Сатель. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
15. Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент. Изд. 3-е, перераб. и доп. Учебник для машиностроительных техникумов / В.А. Аршинов, Г.А. Алексеев. – М.: Машиностроение, 1976. – 410 с.
16. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.: ил.
17. Васин С.А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: Учеб. для техн. вузов / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.: ил.
18. Верещака А.С. Резание материалов: Учебник / А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Высш. шк., 2009. – 535 с.: ил.

19. Грановский Г.И. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.: ил.
20. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.: ил.
21. Розенберг А.М. Элементы теории процесса резания металлов / А.М. Розенберг, А.Н. Еремин. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1956. – 319 с.
22. Рубинштейн С.А. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент / С.А. Рубинштейн, Г.В. Левант, Н.М. Орнис, Ю.С. Тарасевич. – М.: Машиностроение, 1968. – 392 с.
23. Barandich C.S. The dependence of the physical and mechanical properties of tool steel alloys from the type of machining / C.S. Barandich, V.S. Antonyuk, V.M. Volkogon, S.P. Vysloukh, S.K. Avramchuk, Y.A. Fedoran // International journal for science and innovations for the industry, Innovations in discrete productions. – Sofia, 1/2015, p.25-27.
24. Барандич К.С. Методика визначення циклічної довговічності матеріалу деталей, що працюють в умовах змінних навантажень / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – №4(75). – С.30-37.
25. Урядов С.А. Влияние технологий обработки на сопротивление усталости деталей машин / С.А. Урядов // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – №9. – с. 8-11.
26. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А.А. Маталин. – М.: Техника, 1971. – 196 с.
27. Сутягин А.Н. Технологическое обеспечение равновесных параметров качества поверхностного слоя деталей машин на основе изучения накопленной энергии в поверхностном слое детали Текст.: дисс. канд. техн. наук. / А.Н. Сутягин. – Рыбинск, 2008. – 152 с.

28. Решетов Д.Н. Надёжность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.
29. Безьязычный В.Ф. Технологические методы обеспечения эксплуатационных свойств и повышения долговечности деталей / В.Ф. Безьязычный, Т.Д. Кожина, Ю.К. Чарковский. – Ярославль: ЯПИ, 1987. – 87 с.
30. Безьязычный В.Ф. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / В.Ф. Безьязычный, Т.Д. Кожина, А.В. Константинов. – М.: МАИ, 1993. – 184 с.
31. Безьязычный В.Ф. Технологическое обеспечение эксплуатационных показателей деталей машин / В.Ф. Безьязычный, Ю.К. Чарковский, В.Н. Крылов. – М.: Машиностроение, 2001. – 217 с.
32. Кожина Т.Д. Технологические основы управления и контроля эксплуатационными показателями деталей машин / Т.Д. Кожина. – Рыбинск: РГАТА, ООО «Формат», 2001. – 519 с.
33. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / О.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 179 с.
34. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
35. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.: ил.
36. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
37. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
38. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

39. Машиностроение: энциклопедия. Т. IV-3 «Надежность машин» / В.В. Ключев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др.; ред. В.В. Ключев. – М.: Машиностроение, 1998. – 592 с.
40. Качество машин: справочник. В 2-х т. Т.1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др.; ред. А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
41. Барандич К.С. Вплив параметрів шорсткості оброблених поверхонь на характеристики опору втоми деталей / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.І. Паткевич // Вісник ЧДТУ. – 2015. – № 1. – С.116–122.
42. P.V. Jadhav, D.S. Mankar·Effect of surface roughness on fatigue life of machined component of Inconel 718 // Bharati Vidyapeeth Deemed University College of Engineering (Pune), International Conference vol. 11, 2010, p. 11.
43. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник / А.А. Маталин. – СПб.: Лань, 2008. – 512 с.: ил.
44. Y. B. Guo, W. Li and I. S. Jawahir Surface integrity characterization and prediction in machining of hardened and difficult-to-machine alloys: a state-of-art research and analysis // Machining Science and Technology. 2009, vol. 4, p. 437-470.
45. O. Karabelchtchikova, Iris V. Rivero Variability of Residual Stresses and Superposition Effect in Multipass Grinding of High-Carbon High-Chromium Steel // Journal of Materials Engineering and Performance, Vol.14(1), 2005, p.50–60.
46. R. M'Saoubi, J.C. Outeiro, H. Chandrasekaran, O.W. Dillon Jr., I.S. Jawahir A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products Int. J. Sustainable Manufacturing, Vol. 1, 2008, p. 203–236.
47. J.C. Outeiro, J.C. Pina, R. M'Saoubi, F. Pusavec, I.S. Jawahir Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials CIRP Annals // Manufacturing Technology vol. 57, 2008, p. 77–80.

48. D. Umbrello¹, A. D. Jayal, S. Caruso¹, O. W. Dillon, and I. S. Jawahir Modeling of white and dark layer formation in hard machining of AISI 52100 bearing steel // *Machining Science and Technology* , vol. 14, 2010, p.128-147.
49. Карпенко Г.В. Малоцикловая усталость стали в рабочих средах / Г.В. Карпенко, К.Б. Кацов, И.В. Кокотайло, В.П. Руденко. – К: Наукова думка, 1977. – 111 с.
50. Barandich C.S. The limit of endurance, as the main indicator of operational properties details of devices / C.S. Barandich, Vysloukh S.P., Voloshko O.V. // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Зб. наук. пр. – 2014. – №786. – С. 35-39.
51. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с., ил.
52. Dipl.-Ing. Ataollah Javidi Influence of Machining on the Surface Integrity and Fatigue Strength of 34CrNiMo6 Steel / Thesis in partial fulfilment of the requirements for the degree of a Doctor of ontanistic Sciences (Dr. mont.), Leoben, July 2008, 147p.
53. Берник П.С. Технологічні методи забезпечення надійності машин / П.С. Берник, І.С. Афтаназін, І.О. Сивак, А.В. Пешко, Ю.М. Голуб, О.С. Конюхов. – Київ: КИТ, 2004. – 148 с.
54. Писаренко В.Г. Технологічні методи підвищення надійності деталей машин. Монографія / В.Г. Писаренко, П.С. Берник, Р.І. Сивак. – Вінниця: Едельвейс і К, 2008. – 167 с.
55. Адамсон А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
56. Мелничук П.П. Технологія машинобудування: Підручник / П.П. Мелничук, А.І. Боровик, П.А. Лінчевський, Ю.В. Петраков. – Житомир: ЖДТУ, 2005. – 882 с.
57. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченко. – Минск: Наука и техника, 1977. – 255 с.

58. D. G.Thakur, B. Ramamoorthy, L. Vijayaraghavan Effect of High Speed Cutting Parameters on the Surface Characteristics of Superalloy Inconel 718 // Proceedings of the World Congress on Engineering. Vol III, 2010, p.45-53.
59. Ghani, A.K., I.A. Choudhury, Husni, Study of Tool Life, Surface Roughness and Vibration in MachiningNodular Cast Iron with Ceramic Tool // Journal of Materials Processing Technology. vol. 127, 2002, pp. 17-22.
60. Samanta B. Surface Roughness Prediction in Machining Using Soft Computing // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. vol. 22, 2009, pp. 257-266.
61. Kadirgama K., M.M. Noor, N.M. Zuki N.M., M.M. Rahman, M.R.M. Rejab, R. Daud, K.A. Abou-El-Hossein Surface Roughness Prediction Model of 6061-T6 Aluminum Alloy Machining Using StatisticalMethod // European Journal of Scientific Research, vol. 25, 2009, pp. 250-256.
62. Mike S. Lou, Joseph C. Chen, Caleb M. Li Surface Roughness Prediction Technique for CNC End-Milling // Journal of Industrial Technology. vol. 15, 1998, p. 67-80.
63. Abdullah, A.B., L.Y. Chia, Z. Samad The Effect of Feed Rate and Cutting Speed to Surface Roughness // Asian Journal of Scientific Research, vol. 1, 2008, pp. 12-21.
64. D. Philip Selvaraj, Palanisamy Chandramohan Influence of Cutting Speed, Feed Rate and Bulk Texture on the Surface Finish of Nitrogen Alloyed Duplex Stainless Steels during Dry Turning // Engineering, vol. 2, 2010, pp. 453-460.
65. T. Zaborowski, V. Serebryakov Evaluation surface roundness roughness on product from stainless steels at cutting // Acta technical corviniensis – bulletin of engineering. Tome III, 2010, pp. 53-58.
66. R. Hikiji, E. Kondo, N. Kawagoishi, M. Arai Generation mechanism of work hardened surface layer in metal cutting // JSME International Journal, Series C, Vol. 47, 2004, pp. 405-411.

67. J. Novakova, L. Petrkovska, J. Brychta, R. Cep, L. Ocenasova Influence of High Speed Parameters on the Quality of Machined Surface // World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol. 56, 2009, pp. 274-277.
68. Боровский Г.В. Высокопроизводительная прецизионная обработка закаленных сталей малоразмерным инструментом из кубического нитрида бора (КНБ) / Г.В. Боровский, Б.Е. Пини, Е.А. Хачикян // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – №2(14), т. 2. – С. 30-38.
69. Volkogon V.M., Antonyuk V.S. The effect of grafite-like boron nitride to the formation of residual stresses, strength, and performance of materials based on wurtzitic boron bitride // Jornal of Superhard Materials., Vol. 23, No 5, pp.50-53, 2001.
70. Y.Kevin Chou, Chris J. Evans, Moshe M. Barashb Experimental investigation on cubic boron nitride turning of hardened AISI 52100 steel, Journal of Materials Processing Technology, Volume 134, Issue 1, 1 March 2003, Pages 1–9. Access mode: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00070-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00070-5).
71. Antonyuk V.S. Formation of wear-resistant antifriction composite coatings reinforced with ultradispersed diamond // jornal of Superhard Materials., Vol. 20, No 4, pp.66 – 69, 1998.
72. Balan Cristina- Iuliana Factors influencing surface integrity in hard machining of steels- A review / International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6, Issue 5, May-2015, pp. 38-43.
73. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов / Карпенко Г.В. – К: Наукова думка, 1976. – 127 с.
74. Волкогон В.М. Влияние скорости обработки Гексанитом-Р на выносливость стали ХВСГ [Текст] / Волкогон В.М., Антонюк В.С., Аврамчук С.К., Кравчук А.В., Котляр Д.А., Федоран Ю.А. // Сборники научных работ НТУ "ХПИ" : Різання та інструмент в технологічних системах №80 – НТУ "ХПИ", 2011. – с. 38-42 ISSN 2078-7405
75. Федоран Ю.А. Исследование влияния режимов механической обработки на усталостные характеристики инструментальных легированных

- сталей / Ю.А. Федоран, Е.С. Барандич, В.М. Волкогон, В.С. Антонюк, С.П. Выслоух, С.К. Аврамчук // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сборник научных трудов. – 2015. – №36. – С.38-43.
76. A. Pramanik, A. R. Dixit, S. Chattopadhyaya, M. S. Uddin, Yu Dong, A. K. Basak, G. Littlefair Fatigue life of machined components Adv. Manuf. (2017) 5:59–76 DOI 10.1007/s40436-016-0168-z..
77. Abra.o AM, Aspinwall DK (1996) The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel. Wear 196(1):279–284.
78. S. Thamizhmanii, S. Hasan Measurement of surface roughness and flank wear on hard martensitic stainless steel by CBN and PCBN cutting tools // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering Volume 31 ISSUE 2 December 2008, p. 415–421.
79. Барандич Е.С. К вопросу технологического обеспечения требуемых эксплуатационных свойств деталей приборов / Е.С. Барандич, С.П. Выслоух // Справочник. Инженерный журнал. – 2015. – № 2. – С. 34-38.
80. ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – затв. та введ. 1981-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 34 с.
81. Терентьев В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. пособие. / В.Ф. Терентьев, А.А. Оксогоев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
82. ГОСТ 23207-78 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 48 с.
83. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. – затв. та введ. 1986-01-01, № 2515. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 37 с.
84. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення: ДСТУ ГОСТ 25142:2009 – ДСТУ ГОСТ 25142:2009. – [Чинний від 01.02.2009]. — К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 22 с. (Національні стандарти України).
85. Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом Частина 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT): ДСТУ ISO 6507-1:2007. –

- [Чинний від 01.01.2009]. — К.: Держспоживстандарт України, 2009. — 25 с. (Національні стандарти України).
86. Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: моногр. / С.П. Вислоух. — К.: НТУУ «КПІ», 2011. — 488 с.
 87. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности: Справ. изд./ [Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.]; под ред. С.А. Айвазяна. — М.: Финансы и статистика, 1989.— 607с.: ил.
 88. Дронов С.В. Многомерный статистический анализ. Учебное пособие. — Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2003. — 213 с.
 89. Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. и др. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ; пер. с англ. И.С. Енюкова. — М.: Финансы и статистика, 1989. — 215 с.: ил. ISBN 5-279-00247-X.
 90. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник.— СПб: Питер, 2001.— 752 с.: ил. ISBN 5-318-00220.
 91. Лоули Д., Максвелл А., Факторный анализ как статистический метод; пер. с англ. Ю.Н. Благовещенского. — М.: Мир, 1967. — 144 с.
 92. Айвазян С.А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. — Москва: ЮНИТИ, 1998. — 1005 с.
 93. Орлов А.И. Статистические методы анализа данных. Учебник. — Москва: Экзамен, 2006. — 501 с.
 94. Барандич К.С. До питання визначення оброблюваності конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Збірник наукових праць «Прогресивні технології та прилади». — 2011. — №1. —, С. 14-26.
 95. Барандич К.С. Методика визначення раціональних режимів обробки конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. — 2011. — Вип. 41. — С. 110-119.
 96. Барандич К.С. Вибір раціональних режимів обробки конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Процеси

механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – 2011. – Вип. 10. – с. 64-72.

97. Пат 62914 Україна, МПК В23Q 15/00/ Спосіб неруйнівного визначення оброблюваності конструкційних матеріалів та оброблювальних властивостей інструментальних матеріалів [Текст] / Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С. (Україна); заявник та патентовласник Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С. – № u201100718; заявл. 24.01.2011; опубл. 26.09.2011, Бюл. №18. – 4с.:іл.

98. Пат. 87048 Україна, МПК G01N 3/58. Спосіб визначення відносної оброблюваності матеріалів [Текст] / Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С., Філіпова М.В. (Україна); заявник та патентовласник Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С., Філіпова М.В.. – № 201306455; заявл. 24.05.2013; опубл. 27.01.2014, Бюл. №2. – 5с.:іл.

99. Касьян М. В. К вопросу оптимизации режимов резанья по нескольким выходным параметрам / М.В. Касьян, Г.Б. Багдасарян // Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов. – 1987. – С. 4 – 8.

100. Бабенко Э.Г. Расчет режимов резания при механической обработке металлов и сплавов / Э.Г. Бабенко. – Хабаровск: ДГАПС, 1997.–65 с.

101. Локтев.Т. Автоматизированный расчет режимов резания и норм времени / Т. Локтев. – М.: Машиностроение, 1990. –80 с.

102. Чистяков А.В. Оптимизация експлуатационно-технических процесов в машиностроении / А.В. Чистяков, В.И. Бутенко, А.Я. Гоголев. – Новочеркасск: НГТУ, 1997. – 228 с.

103. Рыжов Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки/ Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков; ред. А.П. Гавриш, АН. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.

104. Яковс Г.Ю. Оптимизация режимов резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации // Г.Ю. Яковс, Э. Яков, Д. Кохан. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.: ил.

105. Татаркин А.В. Оптимизация режимов обработки по критерию себестоимости обработки / А.В. Татаркин, А.А. Черепанов, А.В. Балашов // Вестник машиностроения. – 2000. – №11. – с. 44-46.
106. Самотугин С.С., Мазур В.А., Антонюк В.С., Вислоух С.П. Оптимизация режимов плазменной обработки инструментальных сталей с оплавлением поверхности. //Современные проблемы и перспективы развития станко-инструментального производства и совершенствования подготовки кадров: Материалы международной научно-методической конференции 8-11 сентября 2003г., г. Мариуполь. – Мариуполь: Приазовский государственный технический университет, 2003. – С. 49–52.
107. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Мазур В.А., Самотугин С.С. Оптимизация технологических параметров процесса формирования упрочняющих покрытий. //Технологические системы. Научно-технический журнал. №4(20), 2003. – С.44–48.
108. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Мірненко В.І. Оптимізація технологічного процесу нанесення вакуум-плазмових покриттів за критеріями короткочасної статичної міцності та пластичності // Технологические системы. Научно-технический журнал. № 2(22), 2004. – С. 37-41.
109. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Мірненко В.І., Рутковський А.В. Багатокритеріальна оптимізація технологічних параметрів формування вакуум-плазмових покриттів // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси.: ЧДТУ., 2004. – Вип. № 2. – С.71-76.
110. Патент України № 52846 МКВ В23Q15/00. Спосіб оптимізації процесу різання /Антонюк В.С., Вислоух С.П. – Заявлено 26.01.1987. Опубл. 15.01.2003. – Бюл. № 1.
111. Декларативний патент на корисну модель. № 16732 UA, В23Q 15/00. Спосіб визначення оптимальних технологічних параметрів обробки конструкційних матеріалів. / Вислоух С.П., Волошко О.В., Філіппова М.В. Бюл. № 8, 2006.

112. Рудаков К.Н. Разработка методики расчетов дисков газотурбинных двигателей методом конечных элементов в трехмерной постановке / К.Н. Рудаков, Шакиб Хамед// Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».Серія Машинобудування. – 2008. –53. – С. 88–94.
113. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций / К.Н. Рудаков. – К.: НТУУ «КПИ», 2011. – 317с.
114. Рычков С.П. MSC. visualNASTRAN для Windows. – М.: ИТ Пресс, 2004. – 552 с.
115. Catherine Barandych, Sergey Vyslouh, Victor Antoniuk, Oleksandr Tymoshenko, Viktor Koval. Lathe Turning Mode Optimization for Parts Working under Conditions of Cyclic Loading. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2016. Vol. 2, No. 2. pp. 53–60.
116. Выслоух С.П. Исследование путей повышения эффективности процесса материалобработки на основе его параметрической оптимизации. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / С.П. Выслоух. – Киев, 1978. – 175 с.
117. Мазур Н.П. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / Н.П. Мазур, Ю.Н. Внуков, А.И. Грабченко и др. ; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. –2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.
118. Безъязычный В.Ф. Расчет режимов резания. Учебное пособие / В.Ф. Безъязычный, И.Н. Аверьянов, А.В. Кордюков – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с.
119. Петраков Ю.В. Лабораторно- комп'ютерний практикум з теорії різання: Навчальний посібник для студентів, що навчаються за напрямом «Інженерна механіка». – Київ: Політехніка, 2006. – 109 с.
120. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / ред. А.М. Дальский, А.Г. Суслов, А.Г. Касилов, Р.К. Мещеряков. – М.:Машиностроение-1, 2003. –944 с., ил.

121. Справочник технолога. Обработка металлов резанием / ред. А.А. Панов. – М.: Машиностроение, 1988. – 773 с.
122. Пучков А. А. Основы технологии машиностроения. Учебное пособие для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» дневной и заочной форм обучения / А. А. Пучков, А. В. Петухов. – Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого, 2009. – 276 с.
123. Общемашиностроительные нормативы времени режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть 2. Нормативы режимов резания. – М: Экономика, 1990. – 472 с.
124. Общемашиностроительные нормативы времени режимов резания: Справочник: В 2-х т. / А.Д. Локтев, И.В. Гушин, В.А. Батуев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.
125. Романов А.Б. Таблицы и альбомы по допускам и посадкам: Справочное пособие / А.Б. Романов, В.Н. Федоров, А.И. Кузнецов. – СПб.: Политехника, 2005. – 88с.: ил.
126. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. Т.1 / ред. А.М.Дальский, А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков, А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение-1, 2003.– 912 с., ил.
127. Баранчиков В.И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов / В.И. Баранчиков, А.В. Жариков, Н.Д. Юдина и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
128. Безъязычный В.Ф. Расчетное определение высоты неровностей обработанной поверхности при точении / В.Ф. Безъязычный // Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвердых синтетических материалов. 1978. – №1. – с. 162.
129. Барандич К.С. Методика визначення циклічної довговічності матеріалу деталей, що працюють в умовах змінних навантажень / К.С. Барандич, С.П.

Вислоух // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – №4(75). – С.30-37.

130. Барандич К.С. Створення кінцево-елементної моделі валу та вирішення крайової задачі напружено-деформованого стану матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – 2014. – Вип. 2 (41). – С. 228-232.

ДОДАТОК А

Тексти програм

ТЕКСТ ПРОГРАМИ БАГАТОФАКТОРНОГО РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

```

{$M 65520,0,655360}
{$N+}
program regress(fff);
uses crt;
type mas=array[0..50,0..50] of integer;
      matr=array[0..30,0..30] of real;
      matr1=array[0..100] of real;
      mas1=array[0..100,0..20] of integer;
      mas4=array[0..100,0..20] of char;
      mas2=array[0..300] of integer;
      mas3=array[0..50] of char;
var   A,G,G0,C,c0,c1:matr;  kod:string[10];
      Z,Zt,b,b1,T,Yp,Yp1,Yg,kor1,Ysred,Xsov,S13:matr1;
      f,f11,ft:matr;  kor,posl:mas2;
      n,np,m,m1,m0,i,j,i1,j1,k,k1,k2,s1,kolotkl,N1:integer;
      sum,sum1,sum2,del,delta,ys,Ygs,Q,Qost,Qr,Qe,Sost,Sy,Sr,Tsr,
      Xob,S11,S12,S14,S15,S16,Rt:real;
      S,Fr,Ftab,R,FF,Wost,We,Tr,Ttab,alfa,Sost1,Sost2,Svf,S2y,Ysr:real;
      fff,mf,rrr:text; eee:char;
label 1,2,3,4,5,6,7,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,
112,113,114,115,116,117,118,119,120,121,122;
function fl(mz:integer):integer;
      var ff,i:integer;
      begin
        ff:=0;
        for i:=1 to mz do
          ff:=ff*i;
        fl:=ff;
      end;
procedure kombin(var m,q,zzz:integer; var komb:mas1);
var n:real;
i,j,z2,z1,kol:integer;
k1:mas2;
label 31,32,33;
BEGIN      z2:=q;
  for i:=1 to q do begin
    z1:=i;
    komb[1,z2-z1+1]:=m-z1+1; end;
  n:=(fl(m))/(fl(q)*fl(m-q));
  j:=0;
31: j:=j+1;
    kol:=1;
    i:=1;
    if (komb[j,i]>i)
    then
      begin
        for z1:=1 to q do
          k1[z1]:=komb[j,z1];

```

```

        k1[i]:=k1[i]-1;
        for z1:=1 to q do
            komb[j+1,z1]:=k1[z1];
            goto 31;
        end;
        if (komb[j,i]=i)
        then
            begin
32:         kol:=kol+1;
                i:=i+1;
                if(komb[j,i]>i)
                then
                    begin
                        for z1:=1 to q do
                            k1[z1]:=komb[j,z1];
                            k1[kol]:=k1[kol]-1;
                            for z1:=kol downto 1 do
                                k1[z1-1]:=k1[z1]-1;
                            for z1:=1 to q do
                                komb[j+1,z1]:=k1[z1];
                                goto 31;
                            end;
                        if(komb[j,i]=i) then
                            begin
                                if( kol<q) then
                                    goto 32;
                                if( kol>=q) then
                                    goto 33;
                                end;
                            end;
                    end;
33:         zzz:=j;
            end;
function f3(a3:matr):real;
    var determ:real;
    begin
        determ:=a3[1,1]*a3[2,2]-a3[1,2]*a3[2,1];
        f3:=determ;          { writeln(' f3',determ); }
    end;
function f4(a4:matr):real;
    var determ:real;
    begin
        determ:=a4[1,1]*a4[2,2]*a4[3,3]+a4[1,2]*a4[2,3]*a4[3,1]+
        a4[2,1]*a4[3,2]*a4[1,3]-
        a4[1,3]*a4[2,2]*a4[3,1]-
        a4[2,1]*a4[1,2]*a4[3,3]-
        a4[3,2]*a4[2,3]*a4[1,1];
        f4:=determ;          { writeln(' f4',determ); }
    end;

{ ***** }
function f7(nn:integer; aa:matr):real;
var ii,jj,kk:integer;

```

```

dd,yy,ww:real;
begin  dd:=1;          writeln(' f7 begin');
      {  for ii:=1 to nn do begin
        for jj:=1 to nn do
          write(aa[ii,jj]:8:3); writeln end; readln;  }

      for ii:=1 to nn do
begin  kk:=ii; yy:=aa[ii,ii]; { writeln('ii=',ii,' ',aa[ii,ii]); }
  for jj:=ii+1 to nn do
begin  ww:=aa[jj,ii];
  if abs(ww)>abs(yy) then { writeln(aa[jj,ii]);}
begin  kk:=jj; yy:=ww
end
end;
dd:=dd*yy;
if dd=0 then begin f7:=0; writeln('i=',ii,'j=',jj,'exit');
readln;      exit
end;
if ii<>kk then
begin  dd:=-dd;
  for jj:=1 to nn do
begin  ww:=aa[kk,jj];
aa[kk,jj]:=aa[ii,jj];
aa[ii,jj]:=ww
end
end;
for jj:=ii+1 to nn do
begin ww:=aa[jj,ii]/yy;
  for kk:=ii+1 to nn do
aa[jj,kk]:=aa[jj,kk]-ww*aa[ii,kk]
end
end;
f7:=dd;          writeln(' f7',dd);
end;
{ ***** }
function f6(n5:integer; a6:matr):real;
var z21,z22,n42,i2,step2,ii2,kol3:integer;
    minor2:matr1;
    kord2:mas1; aa2:matr;
    determ2:real;
label 61,62,63,64;
begin
  determ2:=0;
  i2:=0;
  for z21:=1 to n5 do
    minor2[z21]:=a6[1,z21];
    step2:=1; ii2:=1;
    for z21:=1 to n5 do
      begin
        step2:=1;
        for z22:=1 to z21+ii2 do
          step2:=step2*(-1);

```

```

        minor2[z21]:=minor2[z21]*step2;
    end;
    n42:=n5-1;
    kombin(n5,n42,kol3,kord2);
    if(n5-1=3) then
        begin
61: i2:=i2+1;
            if(i2<=kol3) then
                begin
                    for z21:=1 to n5-1 do
                        for z22:=1 to n5-1 do
                            aa2[z21,z22]:=a6[z21+1,kord2[i2,z22]];
                            determ2:=determ2+minor2[i2]*f4(aa2);
                            goto 61;
                        end;
                    end;
                    goto 63;
                end;
            if(n5-1>3) then
                begin
62: i2:=i2+1;
                    if(i2<=kol3) then
                        begin
                            for z21:=1 to n5-1 do
                                for z22:=1 to n5-1 do
                                    aa2[z21,z22]:=a6[z21+1,kord2[i2,z22]];
                                    determ2:=determ2+minor2[i2]*f7(n42,aa2);
                                    goto 62;
                                end;
                            end;
                            goto 63;
                        end;
                    end;
63: f6:=determ2;          {      writeln(' f6');      }
                end;
            function f5(n4:integer; a5:matr):real;
            var z11,n41,z12,i1,step,ii,kol9:integer;
                minor:matr1;
                kord:mas1; aa:matr;
                determ:real;
            label 51,52,53,54;
            begin
                n41:=n4-1;
                kombin(n4,n41,kol9,kord);
                determ:=0;
                i1:=0;
                for z11:=1 to n4 do
                    minor[z11]:=a5[1,z11];
                    step:=1; ii:=1;
                    for z11:=1 to n4 do
                        begin
                            step:=1;
                            for z12:=1 to z11+ii do
                                step:=step*(-1);
                                minor[z11]:=minor[z11]*step;

```

```

        end;
i1:=0;
if(n4=3) then
    begin
51:      i1:=i1+1;
        if(i1<=kol9) then
            begin
                for z11:=1 to n4-1 do
                    for z12:=1 to n4-1 do
                        aa[z11,z12]:=a5[z11+1,kord[i1,z12]];
                        determ:=determ+minor[i1]*f4(aa);
                        goto 51;
                    end;
                end;
            end;
        goto 53;
    end;
    if(n4-1>3) then
        begin
52: i1:=i1+1;
            if(i1<=kol9) then
                begin
                    for z11:=1 to n4-1 do
                        for z12:=1 to n4-1 do
                            aa[z11,z12]:=a5[z11+1,kord[i1,z12]];
                            determ:=determ+minor[i1]*f6(n41,aa);
                            goto 52;
                        end;
                    end;
                end;
            goto 53;
        end;
53: f5:=determ;    {  writeln(' f5');    }
    end;
function f2(n4:integer; a2:matr):real;
    var zmax:integer;
    determ:real;
    label 20;
    begin
determ:=a2[1,1];
        if (n4=2) then
            begin
                determ:=f3(a2); {  writeln(' f2-2',determ);  }
                goto 20;
            end;
        if (n4=3) then
            begin
                determ:=f4(a2); {  writeln(' f2-3',determ);  }
                goto 20;
            end;
        if (n4>3) then
            begin
                determ:=f7(n4,a2); { writeln(' f2-7',determ); }
                goto 20;
            end;
    end;

```

```

20:   f2:=determ;           { writeln(' f2',determ);}
    end;

BEGIN
clrscr; textcolor(14);
{ writeln(' ');
WRITELN(' ');
WRITELN(' '); WRITELN;
WRITELN(' ');
WRITELN(' Обработка результатов эксперимента методами:');
WRITELN(' корреляционного и регрессионного анализов');writeln;
WRITELN(' ');
WRITELN(' '); }
textcolor(4);gotoxy(5,14);
WRITE(' Входные данные записаны в файле, или ввод входных');
gotoxy(5,15);write(' данных будет осуществляться с клавиатуры: ');
gotoxy(5,16);textcolor(13);write('<F> - ');textcolor(2);gotoxy(12,16);
write('входные данные записаны в файле');TEXTCOLOR(13);GOTOXY(5,17);
WRITE('<K> - ');TEXTCOLOR(2); GOTOXY(12,17);
WRITE('ввод входных данных будет осуществляться с клавиатуры');
102: gotoxy(20,18);eee:=readkey;
if (eee='k') or (eee='K') then goto 101;
if (eee='f') or (eee='F') then goto 104;
if (eee<>'k') or (eee<>'K') or (eee<>'f') or (eee<>'F') then
begin gotoxy(5,20); textcolor(9); write(
'введи <F> или <K> и ничего другого не нужно'); DELAY(2500);
GOTOXY(4,20);WRITE(
' ');GOTO 102;END;
104:clrscr; assign (fff,'dann2m.pas'); assign (rrr,'rez2m.pas');
textcolor(4); reset(fff); rewrite(rrr);
read(fff,n,m); read(fff,kolotkl,alfa);
readln(fff); readln(fff); for i:=1 to n do
begin for j:=1 to m+kolotkl do
begin
read(fff,a[i,j]);
if j>m then {a[i,j]:=exp(7/6*(ln(a[i,j]))) }
{ a[i,j]:=exp(sqrt(sqrt(a[i,j])))} a[i,j]:=a[i,j]
end;
readln(fff); end; close(fff);goto 107;
101: clrscr; textcolor(2);
write('Число опытов - n = ');readln(n);
writeln(rrr,'Число опытов - n = ',n);
write('Число исследуемых параметров в опыте - m = ');readln(m);
writeln(rrr,'Число исследуемых параметров в опыте - m = ',m);
write('Количество откликов ( Y % ) в опыте = ');readln(kolotkl);
writeln(rrr,'Количество откликов ( Y % ) в опыте = ',kolotkl);
write('уровень значимости alfa = ');readln(alfa);
writeln(rrr,'уровень значимости alfa = ',alfa);
k:=4;k1:=0;
clrscr;for i:=1 to n do begin
textcolor(4);gotoxy(2,2);textcolor(2);write(
'Введите в строку значения параметров и значения откликов'

```

```

,i:3,'-ого опыта:');
if i>1 then
for i1:=1+k1 to i-1 do begin gotoxy(2,2+i1-k1);
textcolor(3);for j1:=1 to m+kolotkl do
write(a[i1,j1]:8:4); writeln; end; gotoxy(2,k-1);
for j:=1 to m+kolotkl do read(a[i,j]);
if k<25 then k:=k+1 else k1:=k1+1; end;k:=0;k1:=0; goto 108;

107: clrscr;writeln(
'          Число опытов - n = ',n);
writeln(' Число исследуемых параметров в опыте - m = ',m);
writeln('    Количество откликов ( Y % ) в опыте = ',kolotkl);
writeln('          уровень значимости alfa = ',alfa:7:5);
textcolor(2); write(' n\m');
textcolor(4); for i:=1 to m do write(i:9);write('    Y');
writeln('          ');
writeln(rrr,'          Результаты вычислений'); writeln(rrr);
writeln(rrr,'          Исходные данные');
for i:=1 to n do begin
a[i,m+kolotkl+1]:=a[i,m+1]; textcolor(14); write(' ',i:2,' ');
write(rrr,' ',i:2,' ');
textcolor(9); for j:=1 to m+kolotkl do
begin
write(a[i,j]:9:4);
write(rrr,a[i,j]:9:4);
end; writeln(rrr);
writeln; if(i/16=round(i/16))then begin
writeln(' нажмите <enter>'); readln; end;
end; READLN;
108: if(kolotkl>1) then
begin
for i:=1 to n do
Ysred[i]:=0.0;
write(' Yсредние ');
for i:=1 to n do
begin
for j:=m+1 to m+kolotkl do
Ysred[i]:=Ysred[i]+a[i,j];
Ysred[i]:=Ysred[i]/kolotkl;
a[i,m+kolotkl+1]:=Ysred[i];
write(a[i,m+kolotkl+1]:8:4);
end;readln;
end;
sum:=0;
for i:=1 to m do
begin
for j:=1 to n do
f[j,i]:=0;
sum1:=a[1,i]; sum2:=a[1,i]; sum:=0;
for j:=2 to n do
begin
if(a[j,i]>sum1) then sum1:=a[j,i];

```



```

if(a[j,i]<sum2) then sum2:=a[j,i];
end; sum:=(sum1+sum2)/2; kor1[i]:=sum; li[i]:=(sum1-sum2)/2;
for j:=1 to n do
begin
  if (a[j,i]>=kor1[i]-1e-6) and (a[j,i]<=kor1[i]+1e-6) then
    f[j,i]:=0;
    f[j,i]:=(a[j,i]-kor1[i])/li[i]; end;
end;
textcolor(14);
writeln(' кодированная матрица данных');
  writeln(rrr,' кодированная матрица данных');
textcolor(13);
for i:=1 to n do
begin write(i:2,' ');
  write(rrr,i:2,' ');
for j:=1 to m do begin fl1[i,j]:=f[i,j];
write(f[i,j]:5:1);
write(rrr,f[i,j]:5:1);
end;
if(i/16=round(i/16))then begin
  writeln(' нажмите <enter>'); readln; end;
writeln; writeln(rrr);
end;
readln;
for i:=1 to n do
begin
  f[i,0]:=1;
  f[i,1]:=fl1[i,1];
  f[i,2]:=fl1[i,2];
  f[i,3]:=fl1[i,3];
  f[i,4]:=fl1[i,4];
  f[i,5]:=fl1[i,5];
  f[i,6]:=fl1[i,6];
  f[i,6+1]:=fl1[i,2]*fl1[i,1];
  f[i,6+2]:=fl1[i,3]*fl1[i,1];
  f[i,6+3]:=fl1[i,4]*fl1[i,1];
  f[i,6+4]:=fl1[i,5]*fl1[i,1];
  f[i,6+5]:=fl1[i,6]*fl1[i,1];
  f[i,6+6]:=fl1[i,3]*fl1[i,2];
  f[i,6+7]:=fl1[i,4]*fl1[i,2];
  f[i,6+8]:=fl1[i,5]*fl1[i,2];
  f[i,6+9]:=fl1[i,6]*fl1[i,2];
  f[i,6+10]:=fl1[i,4]*fl1[i,3];
  f[i,6+11]:=fl1[i,5]*fl1[i,3];
  f[i,6+12]:=fl1[i,5]*fl1[i,4];
  f[i,6+14]:=fl1[i,6]*fl1[i,4];
  f[i,6+15]:=fl1[i,6]*fl1[i,5];
  f[i,6+16]:=fl1[i,1]*fl1[i,1];
  f[i,5+17]:=fl1[i,2]*fl1[i,2];
  f[i,5+18]:=fl1[i,3]*fl1[i,3];
  f[i,5+19]:=fl1[i,4]*fl1[i,4];
  f[i,5+20]:=fl1[i,5]*fl1[i,5];

```

```

        f[i,6+21]:=f11[i,6]*f11[i,6];
    end;
    m1:=m{+1};          { +1 }
    textcolor(11);
    writeln(' матрица F');
    writeln(rrr,' матрица F');
    textcolor(14);
    for i:=1 to n do
    begin write(i:2,' ');
    write(rrr,i:2,' ');
    for j:=0 to m1 do begin
    write(f[i,j]:10:4);   write(rrr,f[i,j]:10:4); end;
        if(i/16=round(i/16))then begin
            writeln(' нажмите <enter>'); readln; end;
        writeln; writeln(rrr);
    end;
    readln;
    for i:=0 to m1 do
    for j:=1 to n do
        ft[i,j]:=f[j,i];
    for i:=0 to m1 do
    for j:=0 to m1 do
        G[i,j]:=0.0;
        for i:=0 to m1 do
        begin
            for j:=0 to m1 do
            begin
                if(i=j) then
                    for i1:=1 to n do G[i,j]:=G[i,j]+f[i1,i]*f[i1,i];
                if(i<>j) then
                    for i1:=1 to n do G[i,j]:=G[i,j]+f[i1,j]*f[i1,i];
            end;
        end; textcolor(2);
        writeln(' матр. G');
        writeln(rrr,' матр. G');
        textcolor(14);
        for j:=0 to m1 do
        begin
            for i:=0 to m1 do
            begin
                write(G[j,i]:10:4);
                write(rrr,G[j,i]:10:4);
            end;
        writeln;   writeln(rrr);
        end;
        for i:=0 to m1 do Z[i]:=0.0;
        for i:=0 to m1 do for j:=1 to n do
            Z[i]:=Z[i]+Ft[i,j]*a[j,m+kolotk1+1];
        for i:=0 to m1 do for j:=0 to m1 do G0[i+1,j+1]:=G[j,i];
        m0:=m1+1; delta:=f2(m0,G0); { }
        for i:=1 to m0 do
        begin

```

```

for j:=1 to m0 do
begin
  k:=0; k1:=0;
  for i1:=1 to m0 do
  begin k1:=0;
    if(i1=i) then goto 1; k:=k+1;
    for j1:=1 to m0 do
    begin
      if(j1=j) then goto 2; k1:=k1+1;
      C0[k,k1]:=G0[i1,j1];
    2: end;
    1: end;
    del:=f2(m1,C0);
    for i1:=1 to i+j do
    del:= del*(-1);
    C1[i,j]:=del;
  end;
end;
textcolor(2);
writeln(' обратная матрица  $C = (Ft * F)^{-1}$ ');
writeln(rrr,' обратная матрица  $C = (Ft * F)^{-1}$ ');
textcolor(14);
  for i:=1 to m0 do
  begin
    for j:=1 to m0 do
    begin { writeln('delta=',delta); }
      C[i,j]:=C1[i,j]/delta;
      write(c[i,j]:11:4);
      write(rrr,c[i,j]:11:4);
    end; writeln; writeln(rrr); end; readln;
    for i:=1 to m0 do
    b[i]:=0.0;
    writeln(' Коэффициенты уравнения регрессии: B[I]');
    writeln(rrr,' Коэффициенты уравнения регрессии: B[I]');
    for i:=1 to m0 do
    BEGIN
      for j:=0 to m1 do
      b[i]:=b[i]+C[i,j+1]*z[j];
      writeln(' B['i,']= ',b[i]:8:5);
      writeln(rrr,' B['i,']= ',b[i]:8:5);
    end;
    readln;
    for i:=1 to m0 do
      Yp[i]:=0.0;
    for i:=1 to n do
      for j:=0 to m1 do
      Yp[i]:=Yp[i]+b[j+1]*f[i,j];
  clrscr;
  writeln(' Д и с п е р с и о н н ы й а н а л и з '); writeln;
  writeln(' (  $Q = Q_{ost} + Q_r$  ) - основное уравнение в дисперсионном');
  writeln(' анализе'); writeln;
  ys:=0; Qr:=0; Qost:=0; Q:=0; Sost:=0.0; Sost1:=0.0;

```

```

for i:=1 to m do
ys:=ys+a[i,m+1];
ys:=ys/n;
if(kolotkl>1) then
begin
sum:=0;sum1:=0.0; sum2:=0.0;
for i:=1 to n do
begin
sum:=0.0; sum2:=sum2+Ysred[i];
for j:=m+1 to m+kolotkl do
begin
sum:=sum+sqr(a[i,j]-Yp[i]); end;
sum1:=sum1+sum*(1/(n*(kolotkl-1))); end; Sost1:=sum1;
ys:=sum2/n;
end;
for i:=1 to n do
begin
Qr:=Qr+sqr(Yp[i]); Qost:=Qost+sqr(a[i,m+1]);
end;
Q:=Qost-n*sqr(ys); Qost:=Qost-Qr; Qr:=Qr-n*sqr(ys);
Sost:=Qost/(n-m0);
writeln(' Q = ',q,' Qr = ',Qr,' Qost = ',Qost); writeln;
writeln(' разница между Q и Qost + Qr = ',Q-(Qost+Qr));
readln; clrscr;
clrscr;
{схема корреляционного анализа}
{ writeln(' К о р р е л я ц и о н н ы й а н а л и з ');
Writeln('Факторные признаки коррелируют между собой или с Y-ом');
writeln('X - факторные признаки коррелируют между собой');
writeln('Y - факторные признаки коррелируют с Y-ом');
118: eee:=readkey;
if (eee='X') or (eee='x') then goto 116;
if (eee='y') or (eee='Y') then goto 117;
if (eee<>'y') or (eee<>'Y') or (eee<>'x') or (eee<>'X') then begin
Writeln(' X или Y и ничего другого'); goto 118; end;
117:
svf:=0;writeln(
'Всего: ',m1,' факторных признаков. Выберите (введя число) сколько из них');
Writeln('будут коррелировать с Y');
112:readln(k2);if (k2<1) or (k2>m1) then begin writeln(
'введите число от ',1,' до ',m1,' не больше и не меньше');
GOTO 112; end; IF (k2=m1) then begin for i:=1 to m1 do posl[i]:=i;
goto 119; end; writeln;writeln(
'Укажите (введя число) их месторасположение в последовательном порядке');
for i:= 1 to k2 do begin
111: read(posl[i]); if (posl[i]<1) or (posl[i]>m1) then begin writeln(
'введите число от ',i,' до ',m1,' и не повторяйте ранее введенные числа');
GOTO 111; end; end;
119:for i:=1 to n do begin Yv[i]:=0;Yv[i]:=Yv[i]+b[0]; for j:=1 to k2 do
Yv[i]:=Yv[i]+F[i,posl[j]]*b[posl[j]]; end; Svf:=0;
for i:=1 to n do Svf:=Svf+(Yv[i]-Ysred[i])*(Yv[i]-Ysred[i]);
110: S2Y:=0; R:=0; Sr:=0; Tsr:=0;Ysr:=0;

```

```

Svf:=Svf/n; for i:=1 to n do Ysr:=Ysr+Ysred[i]; Ysr:=Ysr/n;
for i:=1 to n do S2y:=S2y+(Ysred[i]-Ysr)*(Ysred[i]-Ysr); S2y:=S2y/n;
R:=abs(1-Svf/S2y);
writeln('Коэффициент корреляции R^2=',r); readln;
Sr:=abs((1-r)/sqrt(n)); writeln(
'Статистическая оценка значимости коэффициента корреляции =',Sr);
readln; Tsr:=sqrt(r)/Sr; Writeln(
'Величина коэффициента корреляции сопоставляется с его средней');
writeln(' квадратической ошибкой t: t=',Tsr); readln; goto 113;

116: textcolor(2); writeln(' Всего: ',m1,' факторных признаков. Выберите (введя число)
сколько из них');
writeln('коррелируют друг с другом, включая результативный признак');
114: readln(k2); N1:=n*k2; if (k2<1) or (k2>m1) then begin writeln(
'введите число от ',1,' до ',m1,' не больше и не меньше');
goto 114; end; IF (k2=m1) then begin for i:=1 to m1 do posl[i]:=i;
goto 120; end;
writeln; textcolor(14); writeln(
'Укажите (введя число) их месторасположение ');
for i:= 1 to k2 do begin
115: read(posl[i]); if (posl[i]<1) or (posl[i]>m1) then begin writeln(
'введите число от ',i,' до ',m1,' и не повторяйте ранее введенные числа');
GOTO 115; end; end; Xob:=0;
120: for i:=1 to n do for j:=1 to k2 do
Xob:=Xob+f[i,posl[j]]; Xob:=Xob/N1;
for j:=1 to k2 do begin Xsov[j]:=0; for i:=1 to n do
Xsov[j]:=Xsov[j]+f[i,posl[j]]; Xsov[j]:=Xsov[j]/n; end;
for j:=1 to k2 do begin S13[j]:=0; for i:=1 to n do
S13[j]:=S13[j]+(f[i,posl[j]]-Xsov[j])*(f[i,posl[j]]-Xsov[j]);
S13[j]:=S13[j]/k2 end; S12:=0; for j:=1 to k2 do S12:=S12+S13[j];
S12:=S12/k2; S14:=0; for j:=1 to k2 do
S14:=S14+(Xsov[j]-Xob)*(Xsov[j]-Xob); S14:=S14/k2; S11:=S12+S14;
textcolor(4); Writeln(' РЕЗУЛЬТАТ:');
textcolor(14); writeln('Общая дисперсия по данному признаку: ',S11);
Rt:=sqrt(S14/S11); Writeln('коэффициент корреляции R^2= ',Rt);
Sr:=abs((1-rt)/sqrt(n)); writeln(
'Статистическая оценка значимости коэффициента корреляции =',Sr);
readln; Tsr:=sqrt(Rt)/Sr; Writeln(
'Величина коэффициента корреляции сопоставляется с его средней');
writeln(' квадратическ8ой ошибкой t: t=',Tsr); readln;
}
113: textcolor(4);
writeln(' П р о в е р к а а д е к в а т н о с т и м о д е л и');
writeln; textcolor(2);
writeln(' необходимо получить независимую оценку S^2 при проведении');
writeln(' параллельных опытов , а именно : выбрать в факторном ');
writeln(' пространстве одну точку ( т.е. задать технологический ре-');
writeln(' жим ) и провести в ней несколько независимых опытов');
writeln(' которые применяются при вычислении S^2'); writeln; TEXTCOLOR(4);
Writeln(' Будете проводить серию параллельных опытов ? (y/n)');
122: eee:=readkey;
if (eee='y') or (eee='Y') then BEGIN TEXTCOLOR(2);

```

```

writeln(' введите кол-во проведенных параллельных опытов np:');
readln(np);
writeln(' введите в строку результаты этих опытов:'); writeln;
Ygs:=0.0; for i:=1 to np do begin
read(Yg[i]); Ygs:=Ygs+Yg[i]; end;
Ygs:=Ygs/np; We:=np-1; Wost:=n-m; Qe:=0.0;
for i:=1 to np do
  Qe:=Qe+sqr(Yg[i]-Ygs); S:=Qe/We; textcolor(14);writeln(
' независимая оценка проведенных параллельных опытов  $S^2 =$ ',S:8:4);
readln; goto 121; END;
if (eee='n') or (eee='N') then BEGIN
Ygs:=0.0; for i:=1 to n do
Ygs:=Ygs+Ysred[i];
Ygs:=Ygs/(n); We:=n-kolotkl; Wost:=n-m; Qe:=0.0;
for i:=1 to n do
  Qe:=Qe+sqr(Ysred[i]-Ygs); s:=Qe/We;
  if (s>2) then S:=Qe/(n*m1*(m1+kolotkl));
  if (s=0) then s:=m/n;
  textcolor(14);writeln(
' дисперсия имеющихся опытов  $S^2 =$ ',S:8:4);readln; goto 121; end;

if (eee<>'y') or (eee<>'Y') or (eee<>'x') or (eee<>'X') then begin
Writeln(' X или Y и ничего другого'); goto 122; end;

121: clrscr; writeln; writeln; textcolor(2);
writeln(' проверка гипотезы о значимости');
writeln(rrr,' проверка гипотезы о значимости');
writeln(' коэффициентов регрессии');
writeln(rrr,' коэффициентов регрессии');

for i:=1 to m0 do
t[i]:=abs(b[i])/(sqrt(c[i,i]*S)); writeln; textcolor(4);
writeln(' вывод Трасч. для каждого коэффициента:'); textcolor(14);
writeln(rrr,' вывод Трасч. для каждого коэффициента:');
for i:=1 to m0 do
begin
writeln(' трасч.',i,' = ',t[i], ' b[',i,']=b[i]);
writeln(rrr,' трасч.',i,' = ',t[i], ' b[',i,']=b[i]);
end;
writeln; writeln(rrr);
writeln(' введите Ттабл. при :');
writeln(' доверительная вероятность P=1-alfa=',1-alfa);
writeln(' число степеней свободы: We = ',we);
readln(Ttab); textcolor(76);
writeln(' значимые коэффициенты ');
writeln(rrr,' значимые коэффициенты ');
textcolor(2); k:=0;

for i:={1}0 to m0 do
if (t[i]>Ttab) then
{begin}
{k:=k+1;}

```

```

b1[i]:=b[i] else b1[i]:=0;
for k:=1 to m0 do
    begin
    writeln(' b1['',k,'] = ',b1[k]); writeln(rrr,' b1['',k,'] = ',b1[k]);
    end;
writeln(' нажмите <<enter>>'); readln;

for i:=1 to n do
begin
    Yp1[i]:=0;
    for j:=0 to m0-1 do
        begin
        YP1[i]:=Yp1[i]+f[i,j]*b1[j+1];
        end;
    end;
    sum:=0; sum1:=0; sum2:=0;
    for i:=1 to n do
    begin sum1:=0.0;
    for j:=m+1 to m+kolotkl do
        sum1:=sum1+(a[i,j]-Yp1[i])*(a[i,j]-Yp1[i]);
        sum2:= sum2+sqr(Ysred[i]-Yp1[i]);
        sum:=sum+sum1*(1/(n-k));end;
        sum2:=sum2/(n-k); Sost2:=sum;
        if (kolotkl>1) then Sost2:=sum2; fr:=Sost2/S; TEXTCOLOR(14);
        writeln('      после упрощения модели т.е. отбрасыванием');
        writeln('      незначимых коэффициентов ');
        WRITELN(' оценка дисперсии влияния случайного возмущения Sost2 = ',Sost2);
        writeln(' независимая оценка проведенных параллельных опытов S^2 = ',S);
        writeln(' расчетное значение распределения Фишера Fr= ',Fr);
        writeln(' введите табличное значение распределения Фишера Fтабл. ');
        writeln(' доверительная вероятность P=1-alfa=',1-alfa);
        writeln(' число степеней свободы: Wост.=',n-k,' и We = ',we);
        WRITELN(rrr,' оценка дисперсии влияния случайного возмущения Sost2 = ',Sost2);
        writeln(rrr,' независимая оценка проведенных параллельных опытов S^2 = ',S);
        writeln(rrr,' расчетное значение распределения Фишера Fr= ',Fr);
        writeln(rrr,' введите табличное значение распределения Фишера Fтабл. ');
        writeln(rrr,' доверительная вероятность P=1-alfa=',1-alfa);
        writeln(rrr,' число степеней свободы: Wост.=',n-k,' и We = ',we);
    5: REaDLN(FTAB);
    textcolor(4);
    if(fr<=ftab) then
        writeln(' полученная математическая модель адекватна ');
        writeln(rrr,' полученная математическая модель адекватна ');
    if(fr>ftab) then
        begin
        writeln(' полученная математическая модель не адекватна ');
        writeln(rrr,' полученная математическая модель не адекватна ');
        textcolor(2);
        writeln(' хотите ввести Fтабл. при другом уровне значимости Y/N');
        readln(eee); if (eee='y')OR(eee='Y') then begin
        writeln(' введите Fтабл. при другом уровне значимости');
        goto 5; end;
        end;
end;

```

```

textcolor(14);
writeln(
' Описанная проверка значимости пригодна для упрощения модели');
writeln(
' отбрасыванием незначимых коэффициентов. Однако, из-за их корре-');
writeln(
' лированности такое упрощение часто оказывается совершенно не-');
writeln(
' надежно и приводит к отбрасыванию чрезмерно большого числа коэф-');
writeln(
' фициентов. Как следствие, оценки предсказанных значений отклика');
writeln(
' оказываются смещенными. Лучше оставить в модели незначимые коэф-');
writeln(
' фициенты чем отбросить значимые.');
```

п о с у д и т е с а м и :);

```

READLN; textcolor(14);
writeln(' Y% i значения откликов непосредственно в самом эксперименте');
writeln(' Yp1 значения откликов предсказанные моделью с учетом незна-');
writeln(' чимых коэффициентов');
writeln(' Yp2 значения откликов предсказанные моделью без учета незна-');
writeln(' чимых коэффициентов');
writeln(rrr,' Y% i значения откликов непосредственно в самом эксперименте');
writeln(rrr,' Yp1 значения откликов предсказанные моделью с учетом незна-');
writeln(rrr,' чимых коэффициентов');
writeln(rrr,' Yp2 значения откликов предсказанные моделью без учета незна-');
writeln(rrr,' чимых коэффициентов');
textcolor(2);
for i:=1 to n do
begin
write(i:2,' '); write(rrr,i:2,' ');

for j:=m+1 to m+kolotkl do begin
write(' Y%',j-m,' = ',a[i,j]:8:4,' ');
write(rrr,' Y%',j-m,' = ',a[i,j]:8:4,' ')
end;
write(' Yp1 = ',Yp[i]:10:5);
write(' Yp2 = ',Yp1[i]:10:5); writeln;
write(rrr,' Yp1 = ',Yp[i]:10:5);
write(rrr,' Yp2 = ',Yp1[i]:10:5); writeln(rrr);
if(i/16=round(i/16))then begin
writeln(' нажмите <enter>'); readln; end;
end;
readln; writeln(rrr,' конец вычислений');
105: end.
```


ТЕКСТ ПРОГРАМИ ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

```

Program factor_glavn_fact;
Uses crt,dos;
Label m1,m2,mmm;
Const pi=3.1415926535;
    max:byte=7;
Type matr=Array[1..10,1..50] of real;
    pol=array [1..500] of string[80];
Var
    h,u,v,x1,y1,s,xch: Array [1..50] of real;
    x,z,bp,b,r,a,d,f,dp,tp,vp,pv,rp,ap,pa:matr;
    pom,igor,mt:File of matr;
    mob :File of integer;
    i,q,l,j,m,n,k,mju,c,minus: integer;
    p1,p2,p3,p4,fi,verh,niz,ch: real;
    str: string;
    e:text;

    sfile: ^pol;
    filename: string[12];
    namefile: string[8];
    name: array [1..4] of string[33];
    koordy,koordx,tekpos,fpos,dpos,poscur,ip: integer;
    cel,ost,shag: byte;
    maxy,sumfile: integer;
    ch1: char;

Procedure Change;
var
    info: searchrec;
begin

    findfirst(filename,anyfile,info);
With info do

begin
    getdir(0,str);
    While doserror=0 do
    begin
        If (attr<>directory) Then
            begin
                If sumfile<500 Then sumfile:=sumfile+1 Else Exit;
                If length(str)=3 Then sfile^[sumfile]:=str+name Else sfile^[sumfile]:=str+'\'+name;
                end;
                findnext(info);
            end;

            findfirst('*. *',directory,info);
            While doserror=0 do
            begin
                If (attr=directory) and (name<>'.') and (name<>'..') Then

```

```

begin
getdir(0,str);
chdir(name);
Change;
chdir('..');
end;
findnext(info);
end;
end;
end;

Begin
mmm:
clrscr;
writeln(":12,Метод главных факторов "с итерациями по общностям" ");
writeln;
{-----}
textcolor(7);textbackground(0);
      {Главное меню}
koord:=whereY;
name[1]:='Ввод данных с клавиатуры: ';
name[2]:='Считывание данных из файла: ';
name[3]:='Использование случайных значений: ';
name[4]:='Выход из программы: ';
tekpos:=0;ch1:=#80;
Repeat
Case ch1 of
#80:
begin
If tekpos=4 Then tekpos:=1 Else tekpos:=tekpos+1;
gotoxy(1,koord);
For ip:=1 to 4 do If tekpos=ip Then
begin
textcolor(2);
writeln(name[ip]+'  ');
textcolor(7);
end
Else writeln(name[ip]+' ');
end;
#72:
begin
If tekpos=1 Then tekpos:=4 Else tekpos:=tekpos-1;
gotoxy(1,koord);
For ip:=1 to 4 do If tekpos=ip Then
begin
textcolor(2);
writeln(name[ip]+'  ');
textcolor(7);
end
Else writeln(name[ip]+' ');
end;
end;
end;

```

```

    ch1:=readkey;
Until ch1=#13;

New(sfile);
writeln;

Case tekpos of
    {-----}
    1:
begin

write('введите количество наблюдений = ');
readln(m);
write('введите количество параметров (лиц) = ');
readln(n);
For i:=1 to n do
For j:=1 to m do begin
write('x (',j,',',i,')=');
readln(x[j,i]);
end;
writeln;
write('Сохранить введенные данные ? ');
koordx:=wherex;
poscur:=0;ch1:=#77;
Repeat
case ch1 of
#77:
begin
gotoxy(koordx,wherey);
poscur:=poscur+1;
If poscur=3 Then poscur:=1;
If poscur=1
Then begin textcolor(2);write('Да');textcolor(7);write('/Her')end
Else begin write('Да/');textcolor(2);write('Her');textcolor(7);end;
write('.');
end;
#75:
begin
gotoxy(koordx,wherey);
poscur:=poscur-1;
If poscur=0 Then poscur:=2;
If poscur=1
Then begin textcolor(2);write('Да');textcolor(7);write('/Her')end
Else begin write('Да/');textcolor(2);write('Her');textcolor(7);end;
write('.');
end;
end;

end;
ch1:=readkey;
Until ch1=#13;

writeln;

```

```

    writeln;
If poscur=1 Then
begin
    write('Введите имя текстового файла(без расширения):');
    write(' C:\Save\');readln(namefile);
    namefile:=namefile+'.txt';
    getdir(0,str);
    {$i-}chdir('C:\Save');{$i+}
    If Ioresult=0 Then chdir(str) Else mkdir('C:\Save');
    {$i-}Assign(e,'C:\Save\' + namefile);Rewrite(e);{$i+}
    If Ioresult=0 Then
    begin
        Write(e,m);Write(e,' ');Write(e,n);
        For i:=1 to m do
            begin
                Writeln(e);
                For j:=1 to n do Write(e,x[i,j]:5:2,' ');
            end;
        Close(e);
    end Else
        begin
            writeln;
            write('Данные не были сохранены из-за неправильно введенного имени файла!');
            readln;
        end
    end Else
        begin
            write('Данные не были сохранены!');
            readln;
        end
    end;

    {-----}

    2:
begin
    clrscr;textcolor(2);write(":15");writeln(name[2]);textcolor(7);
    writeln;
    write('Введите имя файла(без расширения), для считывания данных: ');
    readln(namefile);
    If namefile="" Then goto mmm;
    filename:=namefile+'.txt';
    writeln;
    writeln(":15,'Поиск файла '",filename,'" на дисках");writeln;

    sumfile:=0;
    {$i-}chdir('C:\');{$i+}
    If IoResult=0 Then Change;
    {$i-}chdir('D:\');{$i+}
    If IoResult=0 Then Change;

    maxy:=max;
    If sumfile <= maxy Then maxy:=sumfile;

```

```

koordy:=wherey;
gotoxy(1,koordy+maxy+1);
writeln("10,Количество найденных файлов = ',sumfile);
writeln;
write('Используйте клавиши: ',#24,' ',#25,' Enter, Esc - возвращение в меню');

If sumfile=0 Then begin readln;goto mmm end;
window(1,koordy,80,koordy+maxy);
fpos:=0;poscur:=0;
ch1:=#80;
Repeat
Case ch1 of
  #72:
begin
  If poscur<>1 Then poscur:=poscur-1;
  If fpos=1 Then begin fpos:=sumfile;poscur:=maxy end Else fpos:=fpos-1;
  clrscr;
  For ip:=fpos-poscur+1 to fpos-poscur+maxy do
begin
  writeln('(№',ip,'): ',sfile^[ip]);
  end;
  gotoxy(1,poscur);
  write('(№',ip-maxy+poscur,'): ');
  textbackground(0);textcolor(2);
  write(sfile^[ip-maxy+poscur]);
  textbackground(0);textcolor(7);
end;
  #80:
begin
  If poscur<>maxy Then poscur:=poscur+1;
  If fpos=sumfile Then begin fpos:=1;poscur:=1 end Else fpos:=fpos+1;
  clrscr;
  For ip:=(fpos-poscur+1) to (fpos-poscur+maxy) do
begin
  writeln('(№',ip,'): ',sfile^[ip]);
  end;
  gotoxy(1,poscur);
  write('(№',ip-maxy+poscur,'): ');
  textbackground(0);textcolor(2);
  write(sfile^[ip-maxy+poscur]);
  textbackground(0);textcolor(7);
end;
  #27:
begin
  window(1,1,80,25);goto mmm;
end;
end;
ch1:=readkey;
Until ch1=#13;

window(1,1,80,25);
clrscr;

```

```

Assign(e,sfile^[ip-maxy+poscur]);
Reset(e);
{$i-}
Read(e,m);Read(e,n);
For i:=1 to m do
begin
  Readln(e);
  For j:=1 to n do Read(e,x[i,j]);
end;
Close(e);
{$i+}
If Ioresult<>0 Then
begin
  writeln('10,Ошибка в чтении файла "',sfile^[ip-maxy+poscur],"'");
  readln;
  window(1,1,80,25);
  goto mmm;
end;
window(1,1,80,25);
writeln;
end;          {-----}

3:
begin
  clrscr;textcolor(2);write('15');writeln(name[3]);textcolor(7);
  writeln;
  write('Введите размерность матрицы [MxN]: ');
  write('m = ');readln(m);
  write('n = ');readln(n);
  writeln;
  write('Введите порядок и мантиссу элемента a[i,j]:');
  write('cel =');readln(cel);
  write('ost =');readln(ost);
  shag:=1;
  writeln;
  Randomize;
  For i:=1 to m do
  For j:=1 to n do
  begin
    x[i,j]:=Random(Trunc(exp((cel+ost)*ln(10)))/(exp(ln(10)*ost)));
  end;
end;

4:
begin
  Exit;

end;
end;
Dispose(sfile);

For j:=1 to m do begin

```

```

writeln;
For i:=1 to n do
write(x[j,i]:3:0,"0");
end;
readln;
writeln;

For j:=1 to m do begin
ch:=0;
For i:=1 to n do ch:=ch+x[j,i];
xch[j]:=ch/n;
end;

writeln(' средние значения ');
For j:=1 to m do write("2,j, ' = ',xch[j]:8:5);
readln;

For j:=1 to m do
For i:=1 to n do t[j,i]:=x[j,i]-xch[j];

For j:=1 to m do begin
p1:=0;
For i:=1 to n do begin
p1:=p1+sqr(t[j,i]);
end;
s[j]:=sqrt(p1/(n-1));
end;

writeln(' стандартные отклонения ');
For j:=1 to m do write(j, '=',s[j]:8:5,"2);
readln;

For j:=1 to m do begin
p1:=0;
For i:=1 to n do p1:=p1+sqr(t[j,i]);
For i:=1 to n do z[j,i]:=t[j,i]*sqrt(n/p1);
end;

For j:=1 to m do
For k:=1 to m do begin
p1:=0;
p2:=0;
p3:=0;
For i:=1 to n do begin
p1:=p1+t[j,i]*t[k,i];
p2:=p2+sqr(t[j,i]);
p3:=p3+sqr(t[k,i]);
end;
r[j,k]:=p1/(sqrt(p2*p3));
end;

writeln('R');

```

```

For j:=1 to m do begin
writeln;
For k:=1 to m do
write(r[k,j]:6:3,"1");
end;
readln;

```

```

mju:=Trunc((2*m+1)/2-sqrt(2*m-1));
writeln;

```

{Вычисление факторных нагрузок}

{-----}

```

writeln(":25,'Центроидный ');
For j:=1 to m do begin
p1:=-1;
For k:=1 to m do begin
If j=k Then k:=k+1;
If k=m+1 Then goto m1;
If p1<r[k,j] Then p1:=r[k,j];
end;
m1:
r[j,j]:=p1;
end;
p2:=0;
For j:=1 to m do
For k:=1 to m do p2:=p2+r[k,j];
For j:=1 to m do begin
p1:=0;
For k:=1 to m do p1:=p1+r[k,j];
h[j]:=p1*p1/p2;
r[j,j]:=h[j];
end;

```

```

For j:=1 to m do write('h',j,'=',h[j]:4:2,' ');
readln;

```

```

writeln(":25,'Максимальных значений');
r[1,1]:=0;
For i:=1 to m do begin
p1:=r[1,i];
For j:=1 to m do begin
If i<>j Then
If p1<r[j,i] Then p1:=r[j,i];
end;
h[i]:=p1;
end;
r[1,1]:=1;
For j:=1 to m do write('h',j,'=',h[j]:4:2,' ');
readln;

```



```

For j:=1 to m do r[j,j]:=1;
writeln("25,'KMK');
(*opredelitel*)
tp:=r;
minus:=1;
For k:=1 to m-1 do begin
For i:=k to m do
If tp[i,k]<>0 Then begin
For q:=1 to m do xch[q]:=tp[k,q];
For q:=1 to m do tp[k,q]:=tp[i,q];
For q:=1 to m do tp[i,q]:=xch[q];
If i<>k Then minus:=minus*(-1);
i:=m;
end;

For j:=k+1 to m do begin
If tp[k,k]<>0 Then p1:=-tp[j,k]/tp[k,k] Else p1:=0;
For i:=1 to m do tp[j,i]:=tp[j,i]+tp[k,i]*p1;
end;
end;

p4:=minus;
For i:=1 to m do p4:=p4*tp[i,i];
writeln("10,'opredelitel = ',p4:4:2);

If ABS(p4)<0.0001 Then begin
writeln;
write('обратной матрицы не существует (определитель=0)');
readln;
Exit;
end;

(*minor*)
For q:=1 to m do begin
tp:=r;
For i:=1 to m-1 do
For k:=1 to m do If i<q Then tp[i,k]:=tp[i,k] Else tp[i,k]:=tp[i+1,k];
For k:=1 to m-1 do
For i:=1 to m do If k<q Then tp[i,k]:=tp[i,k] Else tp[i,k]:=tp[i,k+1];

minus:=1;
For k:=1 to (m-1)-1 do begin
For l:=k to m-1 do
If tp[l,k]<>0 Then begin
For c:=1 to m-1 do xch[c]:=tp[k,c];
For c:=1 to m-1 do tp[k,c]:=tp[l,c];
For c:=1 to m-1 do tp[l,c]:=xch[c];
If l<>k Then minus:=minus*(-1);
l:=m-1;
end;

For j:=k+1 to (m)-1 do begin

```

```

If tp[k,k]<>0 Then p1:=-tp[j,k]/tp[k,k] Else p1:=0;
For i:=1 to (m)-1 do tp[j,i]:=tp[j,i]+tp[k,i]*p1;
end;
end;
p3:=minus;
For i:=1 to (m)-1 do p3:=p3*tp[i,i];
h[q]:=1-p4/p3;
end;

For i:=1 to m do begin
write('h',i,'=',h[i]:4:2,' ');
r[i,i]:=h[i];
end;
readln;
{-----}
writeln;
writeln(":5,Начало итерационного процесса ");
writeln;

p4:=0;
Repeat
rp:=r;
Dp:=r;
D:=r;

For i:=1 to m do
For l:=1 to m do If i=l Then b[l,i]:=1 Else b[l,i]:=0;

c:=0;
Repeat
For i:=1 to m do
For l:=1 to m do If i=l Then bp[l,i]:=1 Else bp[l,i]:=0;

For j:=1 to m-1 do begin
For k:=j+1 to m do begin

verh:=2*rp[j,k];
niz:=(rp[j,j]-rp[k,k]);
If (niz>0) or (verh=0) Then fi:=arctan(verh/niz)/2
Else begin
If verh>0 Then fi:=(pi+arctan(verh/niz))/2
Else fi:=(-pi+arctan(verh/niz))/2;
end;

For i:=1 to m do
For l:=1 to m do If i=l Then vp[l,i]:=1 Else vp[l,i]:=0;
vp[j,j]:=cos(fi);
vp[k,k]:=vp[j,j];
vp[j,k]:=sin(fi);
vp[k,j]:=-vp[j,k];

For i:=1 to m do

```

```

For l:=1 to m do tp[i,l]:=0;

For i:=1 to m do
For l:=1 to m do
For q:=1 to m do tp[i,l]:=tp[i,l]+vp[i,q]*dp[q,l];

For i:=1 to m do
For l:=1 to m do pv[l,i]:=vp[l,i];

For i:=1 to m do
For l:=1 to m do begin
p1:=0;
For q:=1 to m do p1:=p1+tp[i,q]*pv[q,l];
dp[i,l]:=p1;
end;

For i:=1 to m do
For l:=1 to m do begin
p1:=0;
For q:=1 to m do p1:=p1+vp[i,q]*bp[q,l];
t[i,l]:=p1;
end;
bp:=t;
rp:=dp;

end;
end;
c:=c+1;

For j:=1 to m do
For k:=1 to m do begin
p1:=0;
For q:=1 to m do p1:=p1+bp[j,q]*d[q,k];
t[j,k]:=p1;
end;
For i:=1 to m do
For l:=1 to m do pv[i,l]:=bp[l,i];
For j:=1 to m do
For k:=1 to m do begin
p1:=0;
For q:=1 to m do p1:=p1+t[j,q]*pv[q,k];
d[j,k]:=p1;
end;

For j:=1 to m do
For k:=1 to m do begin
p1:=0;
For q:=1 to m do p1:=p1+bp[j,q]*b[q,k];
t[j,k]:=p1;
end;
b:=t;

```

```

Until c=3;

write('D');
For i:=1 to m do begin
  writeln;
  For l:=1 to m do
    write(":",d[i,l]:6:3);
  end;
  writeln;

  For j:=1 to m do
    For k:=1 to m do b[j,k]:=t[k,j];

  write(' B * B` ');
  For j:=1 to m do begin
    writeln;
    For k:=1 to m do begin
      p1:=0;
      For q:=1 to m do p1:=p1+b[j,q]*t[q,k];
      write(' ',p1:5:2);
    end;
  end;

  mju:=0;
  For i:=1 to m do
    If d[i,i]>0.0 Then begin
      For l:=1 to m do a[l,i]:=b[l,i]*sqrt(d[i,i]);
      mju:=mju+1;
    end;

  For j:=1 to m do h[j]:=0;
  For i:=1 to m do begin
    For j:=1 to mju do h[i]:=sqr(a[i,j])+h[i];
  end;
  For j:=1 to m do r[j,j]:=h[j];

  writeln;
  writeln('H');
  For j:=1 to m do write('h',j,'=',h[j]:4:2,' ');
  readln;

  writeln(' проверка ');
  For k:=1 to m do begin
    writeln;
    For j:=1 to m do
      write(r[k,j]:6:3,"");
    end;
  end;

  For i:=1 to m do
    For l:=1 to m do begin
      p1:=0;

```

```

For k:=1 to mju do p1:=p1+a[l,k]*a[i,k];
rp[i,l]:=p1;
end;

For k:=1 to m do begin
writeln;
For j:=1 to m do
write(rp[k,j]:6:3,"");
end;
readln;

write("Закончить итерационный процесс ? (да = 1) ");readln(p4);
Until p4=1;

writeln('D');
For i:=1 to m do write(d[i,i]:6:3,"");
writeln;
writeln('H');
For j:=1 to m do write(h[j]:6:3,"");
writeln;

writeln('B');
For i:=1 to m do begin
writeln;
For l:=1 to m do
write(":",b[i,l]:6:3);
end;
readln;
clrscr;

writeln(' Ответ ');
write('A');
For i:=1 to m do begin
writeln;
For l:=1 to m do
write(":",a[i,l]:6:3);
end;
readln;

writeln(' проверка ');
For k:=1 to m do begin
writeln;
For j:=1 to m do
write(r[k,j]:6:3,"");
end;
readln;
For i:=1 to m do
For l:=1 to m do begin
p1:=0;
For k:=1 to mju do p1:=p1+a[l,k]*a[i,k];
rp[i,l]:=p1;
end;

```

```

For k:=1 to m do begin
writeln;
For j:=1 to m do
write(rp[k,j]:6:3,".1");
end;
readln;

{-----}
writeln(":15,'Ортогональное вращение матрицы факторных нагрузок');
writeln(":15,'          Метод "варимакс"");

For j:=1 to mju-1 do
For k:=j to mju do begin
p1:=0;
p2:=0;
p3:=0;
p4:=0;
For i:=1 to m do h[i]:=sqrt(sqr(a[i,j])+sqr(a[i,k]));
For i:=1 to m do begin
x1[i]:=a[i,j]/h[i];
y1[i]:=a[i,k]/h[i];
end;

For i:=1 to m do begin
u[i]:=sqr(x1[i])-sqr(y1[i]);
v[i]:=2*x1[i]*y1[i];
end;

For i:=1 to m do p1:=p1+u[i];
For i:=1 to m do p2:=p2+v[i];
For i:=1 to m do p3:=p3+(sqr(u[i])-sqr(v[i]));
For i:=1 to m do p4:=p4+2*u[i]*v[i];

verh:=p4-2*p1*p2/2;
niz:=p3-(p1*p1-p2*p2)/2;

If (niz>0) or (verh=0) Then fi:=arctan(verh/niz)/4
Else begin
If verh>0 Then fi:=(3.1415+arctan(verh/niz))/4
Else fi:=(-3.1415+arctan(verh/niz))/4;
end;

For i:=1 to m do begin
p1:= x1[i]*cos(fi)+y1[i]*sin(fi);
p2:=-x1[i]*sin(fi)+y1[i]*cos(fi);
x1[i]:=p1;
y1[i]:=p2;
end;

For i:=1 to m do begin
a[i,j]:=x1[i]*h[i];

```

```

a[i,k]:=y1[i]*h[i];
end;
end;

writeln('A');
For i:=1 to m do begin
writeln;
For l:=1 to mju do
write(":",a[i,l]:6:3);
end;
readln;
(*
{-----}
writeln(":",15,'Нахождение вида  $Z = A * F$ ');

For i:=1 to mju do
For l:=1 to m do pa[i,l]:=a[l,i];
For i:=1 to mju do
For l:=1 to mju do begin
p1:=0;
For q:=1 to m do p1:=p1+pa[i,q]*a[q,l];
ap[i,l]:=p1;
end;

{определitel}
t:=ap;
For k:=1 to mju-1 do
For j:=k+1 to mju do begin
p1:=-t[j,k]/t[k,k];
For i:=1 to mju do t[j,i]:=t[j,i]+t[k,i]*p1;
end;
p4:=1;
For i:=1 to mju do p4:=p4*t[i,i];
{minor}
For q:=1 to mju do begin
For l:=1 to mju do begin
t:=ap;

For i:=1 to mju-1 do
For k:=1 to mju do begin
If i<q Then t[i,k]:=t[i,k] Else t[i,k]:=t[i+1,k];
end;
For k:=1 to mju-1 do
For i:=1 to mju-1 do begin
If k<l Then t[i,k]:=t[i,k] Else t[i,k]:=t[i,k+1];
end;

For k:=1 to (mju-1)-1 do
For j:=k+1 to (mju)-1 do begin
p1:=-t[j,k]/t[k,k];
For i:=1 to (mju)-1 do t[j,i]:=t[j,i]+t[k,i]*p1;

```

```

end;
p3:=1;
For i:=1 to (mju)-1 do p3:=p3*t[i,i];

If ODD(l+q) Then p2:=-1 Else p2:=1;
b[l,q]:=p2*p3/p4;
end;
end;

For i:=1 to mju do
For j:=1 to m do begin

p1:=0;
For q:=1 to mju do p1:=p1+b[i,q]*pa[q,j];
ap[i,j]:=p1;
end;
{-----}
For i:=1 to mju do
For j:=1 to n do begin
p1:=0;
For q:=1 to m do p1:=p1+ap[i,q]*z[q,j];
t[i,j]:=p1;
end;

For i:=1 to m do begin
writeln;
write('Z',i,'=');
For l:=1 to mju do begin
If a[i,l]>0 Then str:='+' Else str:='-';
write(str,ABS(a[i,l]):6:3,'*F',l);
end;
end;
*)
readln;
End.

```


ТЕКСТ ПРОГРАМИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ ТОКАРНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Підпрограма Tabela:

```

using System;
using System.ComponentModel.Design;
using System.Security.Permissions;

namespace WindowsFormsApplication3 {
    class SizeInter {
        public SizeInter(int ad1, int ad2) {
            d1 = ad1;
            d2 = ad2;
        }
        public double d1;
        public double d2;
    }

    class Tables {
        public static string[] CutterMaterials = { "Твердий сплав", "Швидкорізальна сталь" };
        public static string SelectedCutterMat = "Твердий сплав";
        static public readonly object[] Materials = { "15X", "15XA", "20X", "30X", "30XPA",
"35X", "38XA", "40X", "45X", "50X" };
        static public string SelectedMat = "15X";
        public static int SelectedQal = 5;
        public static string[] ObrMatrls = { "T5K12V", "T5K10", "T14K8", "T15K6", "T30K4",
"VK8" };
        public static string ObrMatrl = "T5K12V";

        private static int calcedFi {
            get {
                var l = Form1.fi;
                if(l < 30) {
                    return 30;
                }
                if(l >= 30 && l < 45) {
                    return 30;
                }
                if(l >= 45 && l < 60) {
                    return 45;
                }
                if(l >= 60 && l < 90) {
                    return 60;
                }
                if(l >= 90) {
                    return 90;
                }
                return 30;
            }
        }
    }
}

```

```

private static int calcedGamma {
    get {
        var l = Form1.Gamma;
        if(l < -15) {
            return -15;
        }
        if(l >= 0 && l < 10) {
            return 30;
        }
        if(l >= 10 && l < 12) {
            return 10;
        }
        if(l >= 12 && l < 15) {
            return 12;
        }
        if(l >= 15 && l < 20) {
            return 15;
        }
        if(l >= 20 && l < 25) {
            return 20;
        }
        if(l >= 25) {
            return 25;
        }
        return -15;
    }
}

```

```

private static int calcedLambda {
    get {
        var l = Form1.lambda;
        if(l < -5) {
            return -5;
        }
        if(l >= -5 && l < 0) {
            return -5;
        }
        if(l >= 0 && l < 5) {
            return 0;
        }
        if(l >= 5 && l < 15) {
            return 5;
        }
        if(l >= 15) {
            return 15;
        }
        return -5;
    }
}

```

```

private static double calcedR {
    get {

```

```

var l = Form1.R;
if(l < 0.5) {
    return 0.5;
}
if(l >= 0.5 && l < 1) {
    return 0.5;
}
if(l >= 1 && l < 2) {
    return 1;
}
if(l >= 2 && l < 3) {
    return 2;
}
if(l >= 3 && l < 4) {
    return 3;
}
if(l >= 4) {
    return 4;
}
return 0.5;
}
}

```

```

static public double KB {
    get {
        switch(SelectedMat) {
            case "15X":
                return 0.964301;
            case "15XA":
                return 0.872758;
            case "20X":
                return 0.942922;
            case "30X":
                return 0.909953;
            case "30XPA":
                return 0.77379;
            case "35X":
                return 1.030537;
            case "38XA":
                return 0.876676;
            case "40X":
                return 1;
            case "45X":
                return 0.659471;
            case "50X":
                return 0.616456;

            default:
                return 0.964301;
        }
    }
}

```

```

    }
}
static public double ов {
    get {
        switch(SelectedMat) {
            case "15X":
                return 690;
            case "15XA":
                return 700;
            case "20X":
                return 780;
            case "30X":
                return 880;
            case "30XPA":
                return 1570;
            case "35X":
                return 910;
            case "38XA":
                return 930;
            case "40X":
                return 980;
            case "45X":
                return 1030;
            case "50X":
                return 1080;

            default:
                return 690;
        }
    }
}

static public double Pz {
    get {
        var ret = 0.0;

        if(ов <= 600) {
            ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.75 : 0.35;
        } else {
            ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.75 : 0.75;
        }
        return ret;
    }
}

static public double Кмп {
    get {
        return Math.Pow(ов / 750.0, Pz);
    }
}

public static SizeInter[] SizeIners = new SizeInter[] {

```

```

        new SizeInter(0, 3), new SizeInter(3, 6), new SizeInter(6, 10), new SizeInter(10, 18), new
SizeInter(18, 30),
        new SizeInter(30, 50), new SizeInter(50, 80), new SizeInter(80, 120), new SizeInter(120,
180),
        new SizeInter(180, 250), new SizeInter(250, 315), new SizeInter(315, 400), new
SizeInter(400, 500)
    };
    public static SizeInter GetSizeInter(double d) {
        for(int i = 0; i < SizeIners.Length; i++) {
            if(d >= SizeIners[i].d1 && d < SizeIners[i].d2) {
                return SizeIners[i];
            }
        }
        return null;
    }

    static public double Td(int d) {
        for(int i = 5; i < 18; i++) {
            if(i == SelectedQal) {
                var si = GetSizeInter(d);
                var d1 = si.d1;
                var d2 = si.d2;
                var tmpi = 0.45 * Math.Pow(Math.Pow(d1 * d2, 1.0 / 2.0), 1.0 / 3.0) + 0.001 *
Math.Pow(d1 * d2, 1.0 / 2.0);
                return a * tmpi;
            }
        }
        return -1;
    }

    static public int a {
        get {
            switch(SelectedQal) {
                case 5:
                {
                    return 7;
                }
                break;
                case 6:
                {
                    return 10;
                }
                break;
                case 7:
                {
                    return 16;
                }
                break;
                case 8:
                {
                    return 25;
                }
            }
        }
    }

```

```

        break;
    case 9:
    {
        return 40;
    }
    break;
    case 10:
    {
        return 64;
    }
    break;
    case 11:
    {
        return 100;
    }
    break;
    case 12:
    {
        return 160;
    }
    break;
    case 13:
    {
        return 250;
    }
    break;
    case 14:
    {
        return 400;
    }
    break;
    case 15:
    {
        return 640;
    }
    break;
    case 16:
    {
        return 1000;
    }
    break;
    case 17:
    {
        return 1600;
    }
    break;
    }
    return -1;
}

static public double Xpx {

```

```

    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 1 : 1.2;
    }
}
static public double Ypx {
    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.5 : 0.65;
    }
}
static public double Npx {
    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? -0.4 : 0;
    }
}
static public double Cpx {
    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 339 : 67;
    }
}

static public double Xpz {
    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 1 : 1;
    }
}
static public double Ypz {
    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.75 : 0.75;
    }
}
static public double Npz {
    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? -0.15 : -0.15;
    }
}
static public double Cpz {
    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 300 : 200;
    }
}

static public double Xpy {
    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.9 : 0.9;
    }
}
static public double Ypy {
    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.6 : 0.75;
    }
}
static public double Npy {

```

```

    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? -0.3 : -0;
    }
}
static public double Cpy {
    get {
        return SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 243 : 125;
    }
}

static public double Kmv {
    get {
        return Kt * Math.Pow(750 / ов, n);
    }
}

static public double Kt {
    get {
        return 1;
    }
}

static private double n {
    get {
        if(SelectedCutterMat == "Твердый сплав") {
            return 1;
        }

        if(ов < 450) {
            return -1;
        } else {
            return 1.75;
        }
    }
}

static public double Knv {
    get {
        return 1;
    }
}
static public double Kuv {
    get {
        switch(ObrMatrl) {
            case "T5K12V":
                return 0.35;
            case "T5K10":
                return 0.65;
            case "T14K8":

```



```

        return 0.8;
    case "T15K6":
        return 1.1;
    case "T30K4":
        return 1.4;
    case "VK8":
        return 0.4;
    }
    return 0.35;
}
}

public static double Kv {
    get {
        return Kmv * Knv * Kuv;
    }
}

public static double Kpz {
    get {
        var ret = 0.0;
        switch(calcedFi) {
            case 30:
            {
                ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 1.08 : 1.08;
            }
            break;

            case 45:
            {
                ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 1 : 1;
            }
            break;
            case 60:
            {
                ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.94 : 0.98;
            }
            break;
            case 90:
            {
                ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.89 : 1.08;
            }
            break;
        }
        switch(calcedGamma) {
            case -15:
            {
                ret *= 1.25;
            }
            break;

            case 0:

```

```

    {
        ret *= 1.1;
    }
    break;
case 10:
    {
        ret *= 1;
    }
    break;
case 12:
case 15:
    {
        ret *= 1.15;
    }
    break;
case 20:
case 25:
    {
        ret *= 1;
    }
    break;
}
if(SelectedCutterMat == "Твердый сплав") {
    switch(calcedLambda) {
        case -5:
        case 0:
        case 5:
        case 15:
            {
                ret *= 1;
            }
            break;
        }
    } else {
        if(calcedR == 0.5) {
            ret *= 0.87;
        }
        if(calcedR == 1) {
            {
                ret *= 0.93;
            }
        } else if(calcedR == 2) {
            {
                ret *= 1;
            }
        } else if(calcedR == 3) {
            {
                ret *= 1.04;
            }
        } else if(calcedR == 4) {
            {
                ret *= 1.1;
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    }
    }
    return ret;
}
}

```

```

public static double Kpx {
    get {
        var ret = 0.0;
        switch(calcedFi) {
            case 30:
            {
                ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.78 : 0.7;
            }
            break;

            case 45:
            {
                ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 1 : 1;
            }
            break;
            case 60:
            {
                ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 1.11 : 1.27;
            }
            break;
            case 90:
            {
                ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 1.17 : 1.82;
            }
            break;
        }
        switch(calcedGamma) {
            case -15:
            {
                ret *= 2;
            }
            break;

            case 0:
            {
                ret *= 1.4;
            }
            break;
            case 10:
            {
                ret *= 1;
            }
            break;
            case 12:
            case 15:

```

```

    {
        ret *= 1.7;
    }
    break;
case 20:
case 25:
    {
        ret *= 1;
    }
    break;
}
if(SelectedCutterMat == "Твердый сплав") {
    switch(calcedLambda) {
        case -5:
            {
                ret *= 1.07;
            }
            break;
        case 0:
            {
                ret *= 1;
            }
            break;
        case 5:
            {
                ret *= 0.85;
            }
            break;
        case 15:
            {
                ret *= 0.65;
            }
            break;
    }
} else {
    if(calcedR == 0.5) {
        ret *= 1;
    }
    if(calcedR == 1) {
    } else if(calcedR == 2) {
    } else if(calcedR == 4) {
        {
            ret *= 1;
        }
    }
}
return
ret;
}
}

public static double Kpy {

```

```

get {
    var ret = 0.0;
    switch(calcedFi) {
        case 30:
        {
            ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 1.3 : 1.63;
        }
        break;

        case 45:
        {
            ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 1 : 1;
        }
        break;
        case 60:
        {
            ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.77 : 0.71;
        }
        break;
        case 90:
        {
            ret = SelectedCutterMat == "Твердый сплав" ? 0.5 : 0.44;
        }
        break;
    }
    switch(calcedGamma) {
        case -15:
        {
            ret *= 2;
        }
        break;

        case 0:
        {
            ret *= 1.4;
        }
        break;
        case 10:
        {
            ret *= 1;
        }
        break;
        case 12:
        case 15:
        {
            ret *= 1.6;
        }
        break;
        case 20:
        case 25:
        {
            ret *= 1;
        }
    }
}

```

```

    }
    break;
}
switch(calcedLambda) {
    case -5:
    {
        ret *= 0.75;
    }
    break;
    case 0:
    {
        ret *= 1;
    }
    break;
    case 5:
    {
        ret *= 1.25;
    }
    break;
    case 15:
    {
        ret *= 1.7;
    }
    break;
}

if(calcedR == 0.5) {
    ret *= 0.66;
} else if(calcedR == 1) {
    {
        ret *= 0.82;
    }
} else if(calcedR == 2) {
    {
        ret *= 1;
    }
} else if(calcedR == 3) {
    {
        ret *= 1.14;
    }
} else if(calcedR == 4) {
    {
        ret *= 1.33;
    }
}
return ret;
}
}
}
}

```

Основна програма:

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Globalization;
using System.Linq;
using System.Windows.Forms;
using System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting;

namespace WindowsFormsApplication3 {
    public partial class Form1 : Form {

        public static double Smin, Smax;

        public static double Nmin, Nmax, Vmin, Vmax, Pmax, o, A1, A2, Kв, П, Пmin, Пmax;

        public static double D0, nmin, nmax, S, V, t, Nu;

        private void Form1_Load(object sender, EventArgs e) {

        }

        public static double Xpx, Ypx, Kpx, Npx, Cpx, Xpz, Ypz, Cpz, Pz, Kpz, Npz, Kpy, Xpy,
        Ypy, Cpy, Npy, Px;

        public static double Td, Wmax, Wmin, Pmin, DeltaE, Deltaн, D, L, Ld, N, h, s, I, i, Lн, U0,
        DeltaSumm;

        public static double Тпс, Cv, Kv, X, Y, m, Nдв;

        public static double Raneob, Ra, K0, K1, K2, K3, K4, R, Gamma;

        public static double A, D1, D2, Ndv, deltaEy, deltan, T;

        public static double fi, lambda;

        public Form1() {
            InitializeComponent();
            /*chart1.Series["S max"].Points.Clear();
            chart1.Series["S min"].Points.Clear();
            chart1.Series["Ra"].Points.Clear();
            chart1.Series["V min"].Points.Clear();
            chart1.Series["V max"].Points.Clear();*/
        }

        private void PreCalc() {
            Vmin = 70;//Math.PI * D0 * nmin / 1000.0;
            Vmax = 190;//Math.PI * D0 * nmax / 1000.0;

            //Pmax = 10 * Cpx * Math.Pow(t, Xpx) * Math.Pow(S, Ypx) * Math.Pow(V, Npx) *
            Kpx;

```

```

        NДВ = (10 * Cpz * Math.Pow(t, Xpz) * Math.Pow(S, Ypz) * Math.Pow(V, Npz) * Kpz) /
        (1020.0 * 60.0 * Nu);

        DeltaSumm = ((Wmax * Pmax - Wmin * Pmin) + DeltaE + DeltaH + (((Math.PI * D *
        Ld * N) / 1000.0 * s) * I + LH) * U0) / 1000);

        i = 0.45 * Math.Pow(Math.Pow(D1 * D2, 1.0 / 2.0), 1.0 / 3.0) + 0.001 * Math.Pow(D1 *
        D2, 1.0 / 2.0);
        Td = A * i;

        TПс = Math.Pow((Cv * Kv) / (V * Math.Pow(t, X) * Math.Pow(S, Y)), 1.0 / m);

        Ra = K0 * ((Math.Pow(S, K1) * Math.Pow(90 + Gamma, K4)) / (Math.Pow(R, K2) *
        Math.Pow(R, K3)));

        L = Ld + 2;

        h = (D0 - D) / 2;

        I = (D0 - D) / h;

        Π = (1000 * V * S * t) / (Math.PI * D * L * h);

        Πmin = (1000 * Vmin * Smin * t) / (Math.PI * D * L * h);

        Πmax = (1000 * Vmax * Smax * t) / (Math.PI * D * L * h);

        Px = 10 * Cpx * Math.Pow(t, Xpx) * Math.Pow(S, Ypx) * Math.Pow(V, Npx) * Kpx /
        1000.0;

    }

    private void InputRead() {

        var f2 = new Form2();

        fi = double.Parse(textBox1.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        Gamma = double.Parse(textBox3.Text, NumberStyles.Float,
        CultureInfo.InvariantCulture);
        lambda = double.Parse(textBox4.Text, NumberStyles.Float,
        CultureInfo.InvariantCulture);

        R = double.Parse(textBox5.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        Nu = double.Parse(textBox7.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        nmax = double.Parse(textBox8.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        nmin = double.Parse(textBox9.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        Smax = 0.14;//0.2;//double.Parse(textBox10.Text);
        Smin = 0.06;//double.Parse(textBox37.Text);
        Pmax = double.Parse(textBox42.Text, NumberStyles.Float,
        CultureInfo.InvariantCulture);

```



```

        Wmax = double.Parse(textBox11.Text, NumberStyles.Float,
CultureInfo.InvariantCulture);
        Wmin = double.Parse(textBox12.Text, NumberStyles.Float,
CultureInfo.InvariantCulture);
        D = double.Parse(textBox13.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        Raneob = double.Parse(textBox14.Text, NumberStyles.Float,
CultureInfo.InvariantCulture);
        D0 = double.Parse(textBox15.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        Ld = double.Parse(textBox17.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        N = double.Parse(textBox21.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        DeltaE = double.Parse(textBox27.Text, NumberStyles.Float,
CultureInfo.InvariantCulture);
        Deltan = double.Parse(textBox25.Text, NumberStyles.Float,
CultureInfo.InvariantCulture);
        U0 = double.Parse(textBox29.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        o = double.Parse(textBox31.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        A1 = double.Parse(textBox30.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        A2 = double.Parse(textBox33.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        S = double.Parse(textBox34.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        t = double.Parse(textBox36.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        V = double.Parse(textBox39.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        Ndv = double.Parse(textBox6.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
        deltaEy = double.Parse(textBox27.Text, NumberStyles.Float,
CultureInfo.InvariantCulture);
        deltan = double.Parse(textBox25.Text, NumberStyles.Float,
CultureInfo.InvariantCulture);
        T = double.Parse(textBox16.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);

var tmp = textBox19.Text.Split(';');

K0 = double.Parse(tmp[0], NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
K1 = double.Parse(tmp[1], NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
K2 = double.Parse(tmp[2], NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
K3 = double.Parse(tmp[3], NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);
K4 = double.Parse(tmp[4], NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);

//R = double.Parse(textBox5.Text, NumberStyles.Float, CultureInfo.InvariantCulture);

if(f2.ShowDialog(this) == DialogResult.OK) {
}

Xpx = Tables.Xpx;
Ypx = Tables.Ypx;
Cpx = Tables.Cpx;
Npx = Tables.Npx;

Xpz = Tables.Xpz;
Ypz = Tables.Ypz;
Cpz = Tables.Cpz;
Npz = Tables.Npz;

Xpy = Tables.Xpy;

```

```

Ypy = Tables.Ypy;
Cpy = Tables.Cpy;
Npy = Tables.Npy;

Kpx = Tables.Kpx;
Kpy = Tables.Kpy;
Kpz = Tables.Kpz;

Kv = Tables.Kv;

var tmpd = Tables.GetSizeInter(D);
D1 = tmpd.d1;
D2 = tmpd.d2;

A = Tables.a;

textBox16.Text = Tables.a.ToString();

label25.Text = Tables.SelectedQal.ToString();

KB = Tables.KB;

}

static bool graphFlag = false;
static private void DrawGraphics(Form3 f3, double s) {

    double x = 0, y = 0, Cv = 0;
    if(s <= 0.3) {
        Cv = 350;
        x = 0.15;
        y = 0.2;
        m = 0.2;
    } else if(s > 0.3 && s <= 0.7) {
        Cv = 290;
        x = 0.15;
        y = 0.35;
        m = 0.2;
    } else {
        Cv = 280;
        x = 0.15;
        y = 0.45;
        m = 0.2;
    }

    if(!graphFlag) {

        f3.chart1.Series["S min"].Points.AddXY(Smin, 0);
        f3.chart1.Series["S min"].Points.AddXY(Smin, Vmax+10);
        f3.chart1.Series["S max"].Points.AddXY(Smax, 0);
        f3.chart1.Series["S max"].Points.AddXY(Smax, Vmax+10);
    }
}

```

```

        f3.chart1.Series["V min"].Points.AddXY(0, Vmin);
        f3.chart1.Series["V min"].Points.AddXY(Smax*1.1f, Vmin);
        f3.chart1.Series["V max"].Points.AddXY(0, Vmax);
        f3.chart1.Series["V max"].Points.AddXY(Smax*1.1f, Vmax);

        graphFlag = true;
    }

    Px = 10 * Cpx * Math.Pow(t, Xpx) * Math.Pow(S, Ypx) * Math.Pow(V, Npx) * Kpx /
1000.0;
    var p = Math.Pow((Px / 10 * Cpx * Math.Pow(t, Xpx) * Math.Pow(s, Ypx) * Kpx), 1 /
Npx);

    var нДВ = Math.Pow((Ndv * 102060 * Nu) / (10 * Cpz * Math.Pow(t, Xpz) *
Math.Pow(s, Ypz) * Kpz), 1 / (Npz + 1));

    ///////////////////////////////////
    var Pymax = 10 * Cpy * Math.Pow(t, Xpy) * Math.Pow(Smax, Ypy) * Math.Pow(Vmax,
Npy) * Kpy;
    var Pymin = 10 * Cpy * Math.Pow(t, Xpy) * Math.Pow(Smin, Ypy) * Math.Pow(Vmin,
Npy) * Kpy;
    var ds = ((Math.PI * D * Ld * N) / ((1000.0 / U0) * (12.5 - Wmax * Pymax + Wmin *
Pymin - deltaEy - deltan) - L)) / 1000.0;
    f3.chart1.Series["Delta summ"].Points.AddXY(ds, 0);
    f3.chart1.Series["Delta summ"].Points.AddXY(ds, Vmax);

    ///////////////////////////////////
    var tt = (Cv * Kv) / (Math.Pow(T, m) * Math.Pow(t, x) * Math.Pow(s, y));
    f3.chart1.Series["T"].Points.AddXY(s, tt);

    ///////////////////////////////////
    var ra = Math.Pow((K0 * Math.Pow(s, K1) * Math.Pow(90 + y, K4) / Math.Pow(Ra * R,
K4)), 1 / K3);
    f3.chart1.Series["Ra"].Points.AddXY(s, ra+Vmin);

}

public static List<string> ResultLines = new List<string>();

private void button1_Click(object sender, EventArgs e) {
    var f3 = new Form3();
    f3.ResultTextBox.Text = string.Empty;
    ResultLines.Clear();

    try {
        InputRead();
    } catch (Exception ex) {
        MessageBox.Show(@"Дані введено з помилкою!\n\n" + ex.Message, @"Error",
            MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Error);
    }

    return;
}

```

```

    }

    PreCalc();

    f3.chart1.Series.Clear();
    f3.chart1.Series.Add("S min");
    f3.chart1.Series.Add("S max");
    f3.chart1.Series.Add("V min");
    f3.chart1.Series.Add("V max");
    f3.chart1.Series.Add("P");
    f3.chart1.Series.Add("NДВ");
    f3.chart1.Series.Add("Delta summ");
    f3.chart1.Series.Add("T");
    f3.chart1.Series.Add("Ra");
    f3.chart1.Series.Add("Result");
    foreach(var s in f3.chart1.Series) {
        s.ChartType = SeriesChartType.Line;
        s.BorderWidth = 2;
    }

    f3.chart1.Series["Result"].MarkerStyle = MarkerStyle.Circle;
    f3.chart1.Series["Result"].MarkerSize = 10;
    //f3.chart1.Series["Result"].IsValueShownAsLabel = true;

    Calc.Fu(f3);

    f3.ResultTextBox.Lines = ResultLines.ToArray();

    f3.ShowDialog(this);
}

static private class Calc {

    static double C(double S, double v, double o) {
        double tmp = (NДД(Smax, Vmax, o) - NДД(Smin, Vmin, o));
        tmp = A1 * (NДД(S, v, o) - NДД(Smin, Vmin, o)) / tmp;
        tmp += A2 * (П - Пmin) / (Пmax - Пmin);
        tmp *= KB;
        return tmp;
    }

    static public double NДД(double s, double v, double o) {
        var tmp = 14.437 + 0.0048 * v + 13.006 * s - 13.19 * o + 0.002 * v * s - 0.002 * v * o -
5.941 * s *
        o + 0.0000004 * v * v + 2.929 * s * s + 3.013 * o * o;
        tmp = Math.Pow(Math.E, tmp);
        return tmp;
    }

    //{Funksia optimizatii }
    static private double OFunc(double[] x) {

```

```

    return C(x[1], x[2], o);
}

static public void Fu(Form3 f3) {
    var res = NewOpt(f3);
    var tmpΠ = (1000 * res[1] * res[0] * t) / (Math.PI * D * L * h);
    if(tmpΠ > 0) {
        ResultLines.Add("Результат: ");
        ResultLines.Add($"S = {res[0].ToString("0.###")} мм/об");
        ResultLines.Add($"V = {res[1].ToString("0.###")} мм/хв");
        ResultLines.Add($"t = {t.ToString("0.###")} мм");
        ResultLines.Add($"C({res[0].ToString("0.###")}; {res[1].ToString("0.###")}; {res[2].ToString("0.###")}) = {res[3].ToString("0.###")}");
    }

    ResultLines.Add($"Π({res[0].ToString("0.###")}; {res[1].ToString("0.###")}; {t.ToString("0.###")}) = {tmpΠ.ToString("0.###")} 1/хв");
    ResultLines.Add($"N_{Π}({res[0].ToString("0.###")}; {res[1].ToString("0.###")}; {res[2].ToString("0.###")}) = {N_{Π}(res[0], res[1], res[2]).ToString("0")} циклів");
    f3.chart1.Series["Result"].Points.AddXY(res[0], res[1]);
}

}

/// <summary>
/// Return optimal results in array
/// {S,V,o,result}
/// </summary>
/// <returns></returns>
static private double[] NewOpt(Form3 f3) {
    var stepS = 0.0016;
    var stepV = 2.4//5.0;
    List<double> prevS = new List<double>();
    List<double> prevV = new List<double>();
    List<double> prevResults = new List<double>();

    var calcV = Vmin;
    var calcS = Smin;

    while(calcV < Vmax && calcS < Smax) {
        var result = C(calcS, calcV, o);

        if(Checks(calcS, calcV)) {
            prevResults.Add(result);
            prevS.Add(calcS);
            prevV.Add(calcV);
        }

        DrawGraphics(f3, calcS);

        ResultLines.Add($"C({calcS.ToString("0.###")}; {calcV.ToString("0.###")}; {o.ToString("0.###")}) = {result.ToString("0.###")}");
    }
}

```

```

ResultLines.Add("");

    calcS += stepS;
    calcV += stepV;
}

graphFlag = false;

if(prevResults.Count > 0) {
    double maxResult = prevResults.Max();
    int neededId = prevResults.IndexOf(maxResult);
    double maxS = prevS[neededId];
    double maxV = prevV[neededId];
    return new[] { maxS, maxV, o, maxResult };
} else {
    ResultLines.Add("Жоден результат не задовільняє умови.");
    return new[] { 0, 0, o, -1 };
}
}

static bool Checks(double s, double v) {
    var flag = true;

    flag &= Raneob >= Ra;

    flag &= s >= Smin;
    flag &= s <= Smax;

    flag &= v >= Vmin;//(Math.PI*D0*nmin);
    flag &= v <= Vmax;

    var Px = 10 * Cpx * Math.Pow(t, Xpx) * Math.Pow(s, Ypx) * Math.Pow(v, Npx) *
Kpx / 1000.0;
    flag &= Pmax >= Px;

    flag &= Ndv * Nu >= 10 * Cpz * Math.Pow(t, Xpz) * Math.Pow(s, Ypz) *
Math.Pow(v, Npz) * Kpz / 1000.0;

    var Ln = 1000;

    var Pymax = 10 * Cpy * Math.Pow(t, Xpy) * Math.Pow(Smax, Ypy) *
Math.Pow(Vmax, Npy) * Kpy;
    var Pymin = 10 * Cpy * Math.Pow(t, Xpy) * Math.Pow(Smin, Ypy) *
Math.Pow(Vmin, Npy) * Kpy;
    flag &= (0.5 * Td) >= ((Wmax * Pymax - Wmin * Pymin) + deltaEy + deltan +
(((Math.PI * D * Ld * N) / (1000.0 * s)) * I + Ln) * U0)) / 1000.0;// +
Cm*lm/l

    double x = 0, y = 0, Cv = 0;
    if(s <= 0.3) {

```

```

        Cv = 350;
        x = 0.15;
        y = 0.2;
        m = 0.2;
    } else if(s > 0.3 && s <= 0.7) {
        Cv = 290;
        x = 0.15;
        y = 0.35;
        m = 0.2;
    } else {
        Cv = 280;
        x = 0.15;
        y = 0.45;
        m = 0.2;
    }

    var tmp = Math.Pow((Cv * Kv) / (v * Math.Pow(t, x) * Math.Pow(s, y)), 1 / m);
    flag &= T <= tmp;

    return flag;
}
}
}

```

ДОДАТОК Б

Акти впровадження

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Перший заступник Голови Правління,
 Головний інженер ПАТ
 «Науково-виробниче об'єднання
 «Київський завод автоматики»,
 кандидат технічних наук
 Цірук В.Г.
 « 19 » _____ 2017 р.

АКТ

виробничої апробації результатів дисертаційної роботи
 Барандич Катерини Сергіївни
 «Технологічне забезпечення циклічної
 довговічності деталей при їх токарному обробленні»

Дійсний акт констатує, що в умовах ПАТ «Науково-виробниче об'єднання «Київський завод автоматики» співробітниками підприємства – начальником конструкторсько технологічного управління, к.т.н. Возняковським А.О. та начальником механічного цеху Діхтієвським О.В., а також представниками Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» – професором, д.т.н. Антоною В.С. і асистентом кафедри виробництва приладів Барандич К.С. проведено апробацію методики технологічного забезпечення циклічної довговічності деталей, що працюють в умовах знакозмінних навантажень.

В якості об'єкта досліджень вибрано деталь «Вал редуктора», що виготовлена із конструкційної сталі 40Х13 ГОСТ 5632-72, яка працює у важких умовах знакозмінних навантажень.

Проведені дослідження показали, що використання методики технологічного забезпечення циклічної довговічності деталей, яка запропонована в дисертаційній роботі на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Барандич К.С. та полягає у фінішному токарному обробленні матеріалу цього валу пластинами із твердого сплаву ВК6М.

Встановлено оптимальні режими фінішного токарного оброблення деталі «Вал редуктора», що формують поверхневий шар з мінімальними умовами створення втомних мікротріщин і концентраторів напружень і забезпечують максимальні значення циклічної довговічності вала, що працює у важких умовах в режимі стеження зі знакозмінними навантаженнями та витримує не менше $9 \cdot 10^4$ циклів навантаження.

Від НТУУ «КПІ ім. Ігоря
 Сікорського»:
 професор, д.т.н. _____
 Антоною В.С.
 асистент кафедри ВП _____
 Барандич К.С.

Від ПАТ «НВО «Київський завод
 автоматики»:
 начальник КТУ, к.т.н. _____
 Возняковський А.О.
 начальник механічного цеху _____
 Діхтієвський О.В.,

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан приладобудівного факультету
Національного технічного університету
України«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»Тимчик Г.С.
«18» вересня 2017 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Барандич Катерини Сергіївни
«Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей при їх токарному
обробленні»

Ми, ті що нижче підписалися, заступник декана приладобудівного факультету з навчально-методичної роботи к.т.н., доцент Філіппова М.В., виконуючий обов'язки завідувача кафедри виробництва приладів, к.т.н., доцент Шевченко В.В., професор кафедри виробництва приладів, д.т.н., професор Антонюк В.С., склали акт про те, що результати дисертаційної роботи «Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей при їх токарному обробленні» на отримання наукового ступеня кандидата технічних наук асистента кафедри виробництва приладів КПІ ім. Ігоря Сікорського Барандич Катерини Сергіївни використовуються у навчальному процесі кафедри виробництва приладів КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Створена в дисертації методика проведення досліджень конструкційних матеріалів на розтяг і втому, а також дослідження мікроструктури та мікротвердості поверхневих шарів зразків використовується в лекційному курсі дисципліни «Матеріалознавство» студентами приладобудівного факультету. Запропоновані методика технологічного забезпечення циклічної довговічності деталей, що працюють в умовах знакозмінних навантажень, методи багатовимірного статистичного аналізу та математичного моделювання технологічних параметрів і відповідні алгоритми та програми використовуються при викладанні навчальних дисциплін «Технологія приладобудування» та «Моделювання технологічних параметрів».

Крім того, запропонована методика технологічного забезпечення циклічної довговічності деталей використовується для отримання необхідних експлуатаційних характеристик, параметрів якості та надійності приладів, згідно з НДР №2653-п (ДР № 0113U002296) «Розробка ефективних технологій на основі сучасних автоматизованих систем керування якістю виготовлення виробів приладобудування» та НДР № 2026-п (ДР № 0117U004263) «Прилад вимірювання мікротвердості та шорсткості поверхні деталі в автоматичному режимі на верстатах з ЧПК».

Заступник декана приладобудівного
факультету з навчально-методичної роботи,
к.т.н., доцент

Філіппова М.В.

Виконуючий обов'язки завідувача кафедри
виробництва приладів,
к.т.н., доцент

Шевченко В.В.

Професор кафедри виробництва приладів,
д.т.н., професор

Антонюк В.С.

ДОДАТОК В

Список публікацій здобувача

1. Барандич К.С. До питання визначення оброблюваності конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Збірник наукових праць «Прогресивні технології та прилади». – 2011. – №1. – С. 14-26. *Автором запропоновано методика, що дозволяє визначати відносні оброблювані властивості конструкційних матеріалів.*
2. Барандич К.С. Методика визначення раціональних режимів обробки конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2011. – Вип. 41. – С. 110-119. *Автором сформульовано методика врахування властивостей оброблюваних матеріалів при призначенні режимів різання.*
3. Барандич К.С. Вибір раціональних режимів обробки конструкційних матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.В. Волошко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – 2011. – Вип. 10. – с.64-72. *Автором запропоновано використання методики визначення оброблювальних властивостей конструкційних матеріалів з метою призначення раціональних режимів їх оброблення.*
4. Barandich C.S. The limit of endurance, as the main indicator of operational properties details of devices / C.S. Barandich, S.P. Vysloukh, O.V. Voloshko // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Зб. наук. пр. – 2014. – №786. – с. 35-39. *Автором розроблено математичну модель границі витривалості матеріалу деталі після механічного оброблення.*
5. Барандич К.С. Створення кінцево-елементної моделі валу та вирішення крайової задачі напружено-деформованого стану матеріалів / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Редколегія: С.Ф. Пічугін (головний редактор) та ін. – Вип. 2 (41). – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – с. 228-232. *Автором розроблено методика визначення напружено-деформованого стану деталей при експлуатації.*
6. Барандич Е.С. К вопросу технологического обеспечения требуемых эксплуатационных свойств деталей приборов / Е.С. Барандич,

С.П. Выслоух // Справочник. Инженерный журнал.–2015. – № 2. – С. 34-38. (іноземне видання) *Автором обґрунтовано необхідність створення науково обґрунтованої методики призначення раціональних режимів механічного оброблення, що направлена на забезпечення експлуатаційних властивостей деталей.*

7. Барандич К.С. Влияние параметров шерсткости обработанных поверхностей на характеристики опоры в толщину деталей / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.И. Паткевич // Вісник ЧДТУ. – 2015. – № 1. – С.116–122. *Автором проведено дослідження параметрів шерсткості деталей після токарного оброблення та встановлено їх вплив опір в товмі.*

8. Барандич Е.С. Исследование влияния режимов механической обработки на усталостные характеристики инструментальных легированных сталей / Е.С. Барандич, Ю.А. Федоран, В.М. Волкогон, В.С. Антонюк, С.П. Выслоух, С.К. Аврамчук // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – 2015. – №36.–С.38-43. *Автором проведено дослідження втомних характеристик сталей в залежності від режимів їх оброблення.*

9. Barandich C.S. The dependence of the physical and mechanical properties of tool steel alloys from the type of machining / C.S. Barandich, V.S. Antonyuk, V.M. Volkogon, S.P. Vysloukh, S.K. Avramchuk, Y.A. Fedoran // International journal for science and innovations for the industry, Innovations in discrete productions. – Sofia, 1/2015, p.25-27. (іноземне видання) *Автором проведено аналіз впливу технологічних параметрів механічного оброблення на фізико-механічні властивості сталей.*

10. Барандич Е.С. Влияние технологических параметров механической обработки на структурное состояние поверхностных слоев и сопротивление усталости стали ХВСГ / Е.С. Барандич, Ю.А. Федоран, В.М. Волкогон, В.С. Антонюк, С.П. Выслоух, Д.А. Котляр, А.В. Кравчук // Резание и инструмент в технологических системах. – 2015. – №85. – С. 8-16. (Ulrich's

Periodicals Directory) Автором виконано обробку результатів експериментальних досліджень на втому з побудовою кривих втому.

11. Барандич К.С. Методика визначення циклічної довговічності матеріалу деталей, що працюють в умовах змінних навантажень / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – №4(75). – С.30-37. (Google Scholar, WorldCat, BASE, eLibrary) Автором запропоновано методику врахування реальних характеристик конструкційних матеріалів при визначенні циклічної довговічності деталей.

12. Catherine Barandych Lathe Turning Mode Optimization for Parts Working under Conditions of Cyclic Loading / Catherine Barandych, Sergey Vyslouh, Victor Antoniuk, Oleksandr Tymoshenko, Viktor Koval // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2016. – Vol. 2, No. 2. – pp. 53–60. (Google Scholar, Index Copernicus International) Автором отримано теоретико-експериментальну залежність циклічної довговічності деталей зі сталі 40X та розроблено математичну модель оптимізації процесу токарного оброблення

13. Пат 62914 Україна, МПК В23Q 15/00/ Спосіб неруйнівного визначення оброблюваності конструкційних матеріалів та оброблювальних властивостей інструментальних матеріалів [Текст] / Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С. (Україна); заявник та патентовласник Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С.. – № u201100718; заявл. 24.01.2011; опубл. 26.09.2011, Бюл. №18. – 4с.:іл. Автором виконано аналіз аналогів пропонованого способу.

14. Пат. 87048 Україна, МПК G01N 3/58. Спосіб визначення відносної оброблюваності матеріалів [Текст] / Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С., Філіпова М.В. (Україна); заявник та патентовласник Вислоух С.П., Волошко О.В., Барандич К.С., Філіпова М.В.. – № 201306455; заявл. 24.05.2013; опубл. 27.01.2014, Бюл. №2. – 5с.:іл. Автором виконано вдосконалення структурної схеми визначення відносної оброблюваності матеріалів.

15. Барандич К.С. Методика технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей приборов при лезвийной обработке / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 04–08 июня 2012 г., г.Ялта.– Киев АТМ Украины, 2012.– с. 32-33.
16. Барандич Е.С. Технологическое обеспечение необходимых значений эксплуатационных свойств деталей приборов / Е. С. Барандич, С. П. Вислоух // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Достижения молодых учёных в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании» [Текст]+ [Электронный ресурс] / под ред. И.А. Лагерева. – Брянск: БГТУ, 2012. – с. 37-38.
17. Барандич Е. С. Математическое моделирование параметров эксплуатационных свойств деталей приборов / Е.С. Барандич, С.П. Вислоух // Актуальные задачи математического моделирования и информационных технологий: Материалы Международной научно-практической конференции (осенняя сессия), Сочи, 1–7 октября 2013 г. / Соч. гос. ун-т; Науч. ред.: Ю.И.Дрейзис, И.Л.Макарова, А.Р. Симонян, Е.И. Улитина. – Сочи, 2013. –с. 5.
18. Барандич Е. С. Влияние механической обработки деталей на их усталостную прочность / Е.С. Барандич, С.П. Вислоух // Майбутній науковець – 2013: матеріали всеукр. наук.-практ. конф. 6 груд. 2013р., м. Сєверодонецьк. / [укл.: Тарасов В.Ю.]. – Сєверодонецьк: [Технол. ін-т Східноукр. нац. Ун-ту ім. В. Даля (м. Сєверодонецьк)], 2013. – с. 57-59.
19. Барандич Е. С. Анализ влияния качества поверхностного слоя деталей после механической обработки на сопротивление их усталостному разрушению / Е. С. Барандич, С. П. Вислоух // Приборостроение-2014: материалы 7-й Международной научно-технической конференции (19–21 ноября 2014 года, Минск, Республика Беларусь)/ ред. колл.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 248-250.

20. Барандич К.С. Вплив параметрів шорсткості поверхні на опір втоми деталей / К.С. Барандич, С.П. Вислоух, О.І. Паткевич, В.С. Антонюк // Збірник наукових праць III-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», 2–6 лютого 2015 р., м. Львів. – Львів: Вид-во ЛП, 2015. – с. 18-19.
21. Барандич Е.С. Оптимизация режимов токарной обработки при технологическом обеспечении циклической долговечности деталей / Е.С. Барандич, С.П.Вислоух, В.С. Антонюк// Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції 31 травня – 3 червня 2016 року / за заг. ред. В.Д. Ковальова, д-ра техн. наук – Краматорськ : ДДМА, 2016. – с. 12-13.
22. Barandych K.S. Analysis of surface quality and its impact on fatigue life of turned components / K.S. Barandych, S.P. Vysloukh // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 16-17 травня 2017р., м.Київ, ПБФ, НТУУ «КПІ». – 2017.– с.55-56.
23. Барандич К.С. Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей / К.С. Барандич, С.П. Вислоух // Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво (МОМ – 2017): матеріали тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 01-03 листопада 2017 р.): / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.]; відп. за вип.: Сапон Сергій Петрович. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – с. 88-89.